

TRABAJO FINAL DE GRADO:

Las Torres de Teruel

Cimentaciones medievales y recalces realizados hasta la actualidad



Ana Carmen Corral Turón

05312898-J

EXP: 10092

TUTOR: Pilar Rodríguez-Monteverde Cantarell

Aula TFG 1_Coordinador: Luis Moya González_ Adjunta coordinación: María Jesús Muñoz

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

25 de mayo de 2015

Las Torres de Teruel

Cimentaciones medievales y recalces realizados hasta la actualidad

Ana Carmen Corral Turón

Tutor: Pilar Rodríguez-Monteverde Cantarell

Ana Carmen Corral Turón

05312898-J

10092

TUTOR: Pilar Rodríguez-Monteverde Cantarell

Aula TFG 1_Coordinador: Luis Moya González_ Adjunta coordinación: María Jesús Muñoz

Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid

Universidad Politécnica de Madrid

25 de mayo de 2015

ÍNDICE:

1	RESUMEN	3
2	INTRODUCCIÓN:.....	5
3	LAS CIMENTACIONES EN LA EDAD MEDIA:	7
3.1	Uso de cimentaciones superficiales; zapatas:	8
3.1.1	Las fábricas de cimentación:	8
3.2	Cimentaciones en las torres medievales:	9
4	LAS TORRES MUDÉJARES:	11
4.1	Definición breve del Arte Mudéjar:	11
4.2	Las torres campanario:	11
4.2.1	Torres con estructura cristiana:.....	11
4.2.2	Torres con estructura de alminar y campanario superpuesto:	12
4.3	Materiales: ladrillo y yeso.....	14
4.4	Función y simbología de las torres:	14
5	LAS TORRES DE TERUEL:.....	17
5.1	Cimentaciones de las torres y el suelo turolense:	20
5.1.1	Materiales que forman el suelo de cimentación:	21
5.2	Intervenciones sufridas:	21
5.2.1	Recalce de la Torre de San Martín:.....	21
6	METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE TENSIONES Y ASIENTOS:	23
6.1	Peso estimativo:	23
6.2	Tensiones de trabajo:	23
6.3	Tensiones admisibles del suelo:	24
6.4	Asientos:	25
6.4.1	Capa elástica sobre base rígida:	25
6.4.2	Capa elástica indefinida:.....	26
6.5	Tensión de la fábrica de ladrillo:.....	27
7	DOSSIERS:.....	29
7.1	TORRE DE SAN PEDRO:	31
7.2	TORRE DE LA CATEDRAL.....	36
7.3	TORRE DE SAN MARTÍN	41

7.4	TORRE DE EL SALVADOR	48
8	CONCLUSIONES:	55
9	BIBLIOGRAFÍA:	59

1 RESUMEN

El conjunto de torres mudéjares de la ciudad de Teruel, que forman parte del Patrimonio de la Humanidad desde 1986, presentan una serie de giros e inclinaciones notables. En el presente trabajo se estudia la posible relación de estos problemas de giros de las torres y otros posibles efectos de su localización e intervenciones con la composición del suelo sobre el que apoyan.

En primer lugar se hace una breve descripción de cómo eran las cimentaciones durante la Edad Media, centrandó la atención en las cimentaciones superficiales, presentes en la estructura de las torres turolenses. Posteriormente se describe los tipos de torres existentes en el Arte Mudéjar, explicando su estructura, materiales y función.

En segundo lugar se encuentra una serie de dossiers, uno por torre, donde se describen las características propias de cada una de ellas, además de una explicación de las rehabilitaciones e intervenciones que han sufrido y sus planos. Se añade también un sencillo reconocimiento visual de los desperfectos de las torres.

Todo esto, más el uso del estudio geotécnico realizado en 1991, ha permitido la valoración de las condiciones del suelo y los posibles asentamientos que puedan tener las torres, obteniendo una conclusión sobre si el suelo es el causante principal de los giros observados.

Palabras clave: Teruel, torre, arquitectura mudéjar, cimentaciones medievales, recalces antiguos, estudio geotécnico, desplome.

** Toda fotografía, esquema o figura donde no se indique la referencia utilizada son material propio del autor.*

2 INTRODUCCIÓN:

El objeto del presente trabajo es ver si los problemas de giros de las Torres Mudéjares de Teruel tienen su explicación en el suelo sobre el que se apoyan. Varios son los autores que han confirmado este hecho y han propuesto sus conclusiones al respecto.

La metodología seguida para el desarrollo del trabajo es el siguiente:

- En primer lugar, se ha hecho una búsqueda de bibliografía relacionada con las torres turolenses, la arquitectura mudéjar y las cimentaciones en la Edad Media. Después se ha realizado una selección, desechando los títulos más alejados del tema de estudio y se ha procedido a la lectura y toma de notas de los títulos elegidos.
- Posteriormente se ha procedido al análisis de los datos del estudio geotécnico realizado en las torres en 1991 y se han seleccionado aquellos que serían los necesarios para el cálculo de tensiones admisibles del terreno y asientos.
- Se realizó una visita al lugar y se identificó visualmente y se tomó fotografías de los diferentes defectos de las torres. La única que se pudo visitar por el interior fue la Torre de El Salvador.
- Con toda esta información se han obtenido unas características generales de las torres mudéjares y de las cimentaciones medievales además de realizarse un dossier para cada torre, donde se relacionan sus características, defectos observados, planos, restauraciones y rehabilitaciones y el cálculo de asientos y tensiones de trabajo que transmiten al suelo. De esta forma se puede ver si los asientos concuerdan con los giros observados. Al final de cada dossier se han incluido unas conclusiones específicas para cada una de las torres.
- Dentro de estos datos se han incluido posibles causas de los giros defendidas por los autores consultados para poder confirmarlas o negarlas en las conclusiones finales.
- Finalmente se ha procedido a la relación de todos los datos, obteniendo unas conclusiones finales.

3 LAS CIMENTACIONES EN LA EDAD MEDIA:

Los problemas en las edificaciones debidos a las cimentaciones eran muy comunes en la Edad Media, lo cual es normal, ya que no había una conciencia generalizada de la importancia que tenían las características del suelo y de la cimentación elegida a la hora de fundar los cimientos de las construcciones.

Por desgracia, las cimentaciones se consideraban una de las partes menos importantes de los edificios, ya que al situarse bajo la superficie del terreno y estar fuera de la vista, creían que no merecía la pena gastarse dinero en ellas, aprovechando ese dinero para mejorar la estética de los revestimientos, dotando a las edificaciones de una rica apariencia.

Por tanto, como dice Kerisel (2005), la regla era *"tutto fuori, niente dietro"*, lo que quiere decir "todo fuera, nada dentro", y con cierta seguridad se puede decir que era la regla de oro en la Edad Media. Es el caso de las construcciones de la Italia floreciente del siglo XI, donde duques, arzobispos, etc., competían para construir la torre más alta, siendo altura igual a poder. Por ello, muchas colapsaron, a veces por temas estructurales, pero la mayoría de los casos era por las grandes concentraciones de tensiones sobre los suelos de aluviones que se encuentran en esta zona. Un ejemplo fue Bramante, quien en un par de veces tuvo problemas en sus construcciones por no invertir el dinero suficiente en las cimentaciones y gastarlo en los revestimientos de la fachada.

Esto también se trasladaba al resto de la estructura, como se puede ver en torres medievales italianas como el campanario de la Plaza de San Marcos (1173) o la torre de Pavia, las cuales colapsaron sin problemas aparentes previos, resultando raro si estaban construidas con bloques robustos de mármol como aparentemente parecía. Pero al estudiar las ruinas apareció la realidad, ya que la cantidad de mármol respecto a la cantidad de mortero y pequeñas piedras y arena sin limos que apareció era ridícula, confirmando que tan sólo el revestimiento era de mármol (mayor resistencia) y que lo que realmente formaba la estructura portante de la torre era la mezcla de mortero y pequeñas piedras, con menor resistencia. Es así como dejaban que lo que soportara el peso de estas esbeltas torres fuera tan sólo un revestimiento exterior, el cual colapsaría antes o después.

La Edad Media era una época donde la mayoría de las edificaciones se encuentran mal cimentadas, con cimentación superficial y donde el tipo de terreno sobre el que se apoyan no importaba, pudiendo ser duro si había suerte o blando, como solía pasar. Había un desconocimiento total de las características resistentes y deformaciones de los diferentes suelos.

En las construcciones medievales además, como debe pasar, los esfuerzos horizontales se contrarrestan con el propio peso del edificio, pero si la resultante es excéntrica (la fábrica no resiste a tracción), al no calcular de ninguna forma la base de las cimentaciones, se puede producir un incremento de las tensiones en los bordes, por lo que si se suma las malas condiciones del terreno, puede convertirse en un punto con gran asiento y por el que gire el edificio completo.

La duda entonces es cómo han podido llegar a nuestros días ciertas construcciones medievales. Se cree que principalmente puede ser por dos razones principales (García Gamallo, 1997), derivadas de la estructura socioeconómica de entonces, donde los recursos eran escasos (humanos, técnicos y económicos):

- Gracias al ritmo lento de las construcciones por falta de recursos materiales y humanos, el terreno consolidaba mejorando sus condiciones.
- Para ahorrar material, se apoyaban en cimentaciones de edificaciones antiguas, lo cual equivale a un sistema de precarga, y por tanto, de mejora inicial del terreno.

Como se puede ver, la motivación de estas dos razones no era mejorar el suelo si no la de aprovechar los escasos recursos que se tenían para lograr la mayor ostentación posible, pero por casualidad, la falta de recursos ayudó a conseguir unas condiciones del suelo mejores a las iniciales en estos dos aspectos.

A continuación se explican los criterios generales utilizados en cimentaciones superficiales, siendo el tipo de cimentación de las torres objeto de estudio de este trabajo.

3.1 Uso de cimentaciones superficiales; zapatas:

Las cimentaciones superficiales utilizadas en la Edad Media eran las mismas que se llevaban usando desde el siglo V e incluso a medida que se avanzaba hacia los siglos XI y XII los recursos iban a menos, al pasar de la grandeza de un imperio como el Romano a la mala racha socioeconómica de estos siglos.

Los tipos utilizados eran las zapatas corridas (las más frecuentes), las aisladas y las arriostradas. De hecho se cree que las zapatas aisladas aparecieron en esta época con motivo de las catedrales góticas, al aumentar las luces considerablemente entre apoyos aislados (García Gamallo, 1997; Jaramillo Morilla, 1986; Uriel Ortiz, 1987), siendo el único avance asociado a la Edad Medieval.

A grandes rasgos, para el dimensionado de este tipo de cimentación no se tenían en cuenta ni las cargas ni el tipo de terreno, acudiendo al método de "prueba y error", es decir, si la cimentación fallaba durante la construcción, se aumentaba su superficie hasta que soportara las cargas de forma correcta. Sí es cierto que si el terreno era blando, la primera intuición era usar una cimentación más ancha que para terrenos más duros.

Incluso se podía llegar a establecer el tamaño de las zapatas según el espacio que hubiera disponible y la forma que tuvieran las columnas o muros que apoyaban sobre ellas (García Gamallo, 1997; Kerisel, 1975).

Por tanto, al no disponer de la superficie necesaria para transmitir las cargas al terreno, se pueden encontrar zapatas que están transmitiendo tensiones de trabajo mayores de 500 KN/m² cuando, por ejemplo, un suelo medio tiene una tensión admisible de entre 100 y 300 KN/m². Estas tensiones de 500 KN/m² pueden llegar a ser admisibles en terrenos muy duros, como los rocosos.

Incluso el suelo puede llegar a tener una tensión admisible que aguanta la tensión que le transmite la zapata, pero si el módulo de elasticidad (E) del terreno es relativamente pequeño, las deformaciones serán grandes, llegando a provocar movimientos en el edificio y por tanto, fisuras (las estructuras no solían ser flexibles para aguantar estas deformaciones).

Otro problema frecuente era, derivado de la indiferencia ante el suelo sobre el que se cimentaba, la elección de suelos de relleno recientes, los cuales no han consolidado y no trabajan a tensiones efectivas, causando igualmente problemas a futuro.

Como ya se ha comentado, una de las pocas acciones que favorecían las condiciones del suelo era la lentitud del proceso de construcción debido a la falta de recursos, donde había incluso largas temporadas de pausa entre las diferentes etapas, haciendo que el suelo consolidara bajo la lenta puesta en carga. Es más, si había algún tipo de deformación en la construcción, se podía arreglar en la siguiente etapa de construcción.

La otra forma de ahorrar comentada al principio y que favorecía las características del terreno era el uso de cimentaciones de antiguas construcciones, pero era difícil que coincidieran con la planta de la nueva edificación, por lo que el edificio no apoyaba de forma homogénea, generando la posibilidad de futuros asentamientos diferenciales y giros.

Sin embargo, no todas las construcciones corrían los mismos riesgos. Eran las construcciones de la Iglesia las que buscaban, por lo general, mayor ostentación y ahorraban recursos en las cimentaciones, mientras que otros tipos, como las construcciones militares o civiles, buscaban durabilidad y no tanto la estética (Viollet Le Duc, 1875). Todo esto junto a problemas en la superestructura por la incorrecta elección de materiales o desconocimiento mecánico de su funcionamiento serán los causantes de que hayan llegado tan pocas edificaciones a la actualidad.

3.1.1 Las fábricas de cimentación:

Un tipo de cimentación superficial utilizado eran las fábricas de cimentación, las cuales no destacaban por su calidad, aunque esta dependía de los recursos que se tenían.

Según Viollet Le Duc (1875), en el Románico estaban formadas por grandes piedras colocadas sin orden con un baño de mortero, mientras que en el Gótico se revestían con paramentos de sillares en hiladas regulares. Incluso se podía llegar a usar las fábricas de antiguas construcciones.

Por lo tanto, la calidad de la cimentación dependía de la calidad del material, de las dimensiones que se le daba (tanto de canto como de superficie) y las características del suelo sobre el que se apoyaba, ya que no se solía profundizar en el terreno en busca del firme.

Por último, nombrar otra innovación de la Edad Media: los emparrillados de madera. Estos se disponían antes de las cimentaciones, siendo una forma fácil de reforzar el terreno, conseguir aislamiento frente a la humedad del suelo y nivelar el fondo de la zanja sobre terrenos blandos.

En resumen, las cimentaciones superficiales durante la Edad Media no se consideraban una parte relevante del edificio. Las dimensiones no se calculaban (se utilizaba el método de prueba y error) y muchas veces se les dejaba el poco espacio que hubiese, las características del suelo no importaban y los materiales usados eran los más baratos posibles (no se iban a ver) y por tanto de mala calidad en la mayoría de casos. Sin embargo, estas construcciones aún tenían alguna oportunidad al dividirse la construcción en varias fases (por falta de recursos), dando tiempo al suelo a consolidar y existiendo la posibilidad de arreglar deformaciones en la siguiente fase. Otra ventaja en el afán de ahorrar recursos a la hora de utilizar los cimientos de antiguas edificaciones era que estas podían haber mejorado igualmente las cualidades del suelo.

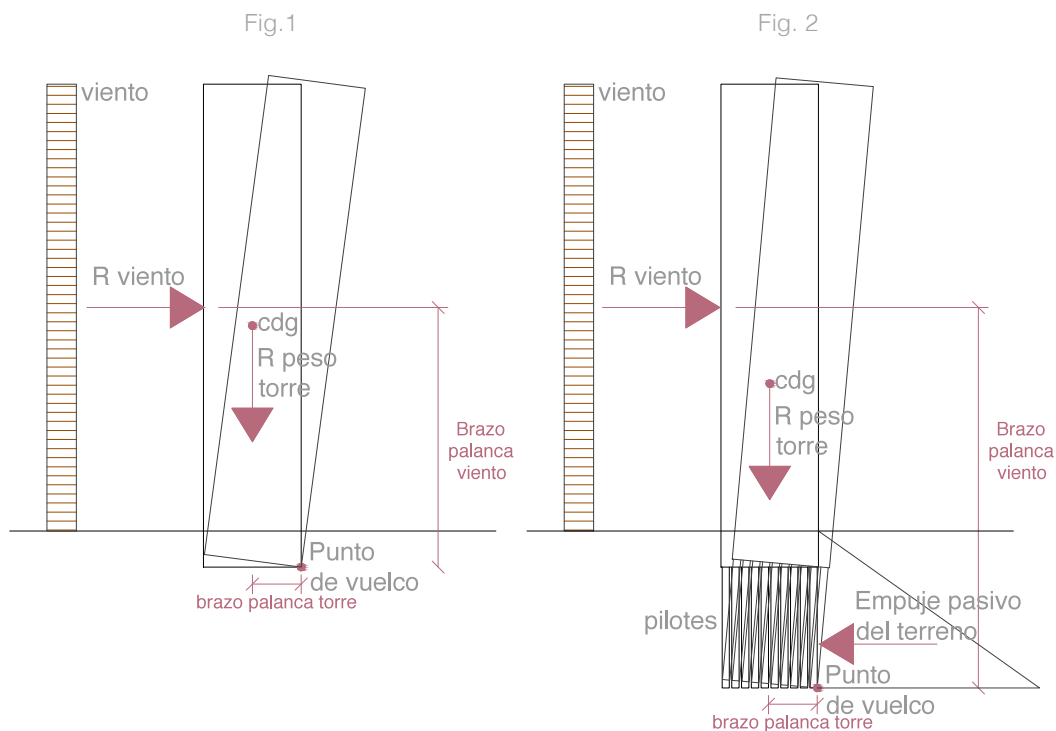
3.2 Cimentaciones en las torres medievales:

Las torres son edificaciones muy sensibles a la acción del viento. Esta mayor o menor influencia del viento sobre ellas dependerá, entre otras cosas, del tipo de cimentación que tengan.

Aquellas que tienen una cimentación superficial (figura 1), serán especialmente sensibles al viento. Esto se debe a que la resultante del viento por su brazo de palanca puede generar un momento mayor sobre el punto de vuelco que la resultante del peso de la torre por su brazo de palanca.

Sin embargo, con cimentación de pilotes (figura 2), el centro de gravedad de la torre baja, además de aumentar el peso de esta, aumentando el momento estabilizador resultante en el punto de vuelco respecto al viento. Aparecerá, gracias al terreno, un empuje pasivo contra la estructura de signo contrario a la resultante del viento, participando en el equilibrio de momentos. El resultado es una mayor estabilidad de la torre frente a la acción del viento.

En la Edad Media, las únicas cimentaciones profundas que se utilizaban eran pilotes de madera hincados en el terreno, que con las técnicas de la época, no alcanzaban una profundidad mayor de 5-6 metros. Por lo tanto, este es otro factor a tener en cuenta a la hora de evaluar los problemas de inclinación de las torres medievales.



4 LAS TORRES MUDÉJARES:

4.1 Definición breve del Arte Mudéjar:

El Mudéjar es un estilo concreto de arquitectura que se desarrolló esencialmente entre los siglos XIII y XVI.

Una definición de mudéjar según G.M. Borrás Gualis (2006) sería:

“Término para nombrar la pervivencia del arte islámico en la España cristiana, fenómeno social y artístico privativo de la historia y de la cultura españolas”.

Es decir, consiste en un estilo que surgió de la mezcla de culturas que se dio en la España medieval, donde a raíz de la Reconquista, se produjo la suma de tradiciones tanto cristianas como islámicas.

En primer lugar se encuentra la asimilación cultural de los musulmanes vencidos, llamados propiamente “mudéjares”, y en segundo lugar se tiene la fascinación que sufrieron los cristianos ante los monumentos islámicos, como los alcázares musulmanes, que se convirtieron en palacios cristianos, o las mezquitas, que los reconquistadores convirtieron en catedrales e iglesias, por lo que el mudéjar es el estilo que retrata las condiciones políticas, sociales y culturales que se estaban dando entonces.

4.2 Las torres campanario:

Haciendo foco en las estructuras mudéjares, se desarrollaron dos tipos de estructuras: las iglesias-fortaleza, de origen cristiano, y las torres-campanario, de origen islámico, dentro de las cuales se encuentran las Torres de Teruel, objeto principal de estudio de este trabajo.

No se desarrollaron tipologías desde cero, si no que cogieron estructuras cristianas e islámicas ya existentes y crearon una variante al integrarlas. Sin embargo esta variante se consolida como modalidad propia, evolucionando en el país, aunque con grandes diferencias según las zonas.

Se van a distinguir dos subtipos:

- Las torres con estructura cristiana.
- Las torres con estructura de alminar musulmán en la parte inferior y un campanario cristiano superpuesto.

4.2.1 Torres con estructura cristiana:

Estas van a ser las más antiguas y se van a desarrollar en torno al 1258. Al parecer son el primer modelo del que luego saldrá el siguiente subtipo al evolucionar el estilo.

Algunos autores, como Mariano Navarro Aranda (1954) o Ricardo García Guereta (1926), no incluyen estas torres dentro de la arquitectura mudéjar, si no que las consideran torres románicas construidas en ladrillo con decoración de cerámica vidriada. Como justificación, hablan de torres románicas en ladrillo similares construidas en Italia. También puede ser por el uso de arcos de medio punto, de clara influencia románica. Sin embargo, otros autores como el Marqués de Lozoya, defienden que el resultado final de una obra mudéjar y una románica no tiene nada que ver.

La estructura consiste en un simple muro perimetral con 4 lados que sube hasta la coronación de la torre, jerarquizándose en otros elementos portantes en la parte superior para permitir la abertura de vanos (para la zona de campanas). Esto significa que aparecen cuerpos ciegos en la parte inferior y en el cuerpo de campanas será donde aparezcan ventanas para la propagación del sonido de las mismas.

Las escaleras se adosan a la cara interior del muro, no siendo independientes de las salas que se

desarrollan a lo largo de la altura de la torre. Se tiene entonces un gran cajón vertical como estructura principal (el muro perimetral) y unos elementos horizontales secundarios.

4.2.2 Torres con estructura de alminar y campanario superpuesto:

Este subtipo es el que se va a desarrollar desde finales del siglo XIII en adelante y va a ser para muchos autores el único tipo de torre propiamente mudéjar.

Se va a encontrar, al igual que en los alminares, una estructura más evolucionada formada por dos torres, una dentro de otra, con las escaleras entre ambas, trabando ambas torres. La interior será la que esté dividida en altura en distintas salas, además de funcionar como núcleo resistente rígido (no aguanta la acción directa del viento). Una vez se llega al cuerpo de campanas, la torre interior desaparece y continúa la exterior en la que se abrirá una serie de vanos reforzando con machones de mayor espesor en ángulos y centro de cada lado, encontrando el típico campanario cristiano.

La planta suele ser cuadrada o rectangular (fig. 4, Santa María de Ateca), ya que su origen son los alminares islámicos, siendo una de las mejores referencias La Giralda de Sevilla (fig. 3, con rampa en vez de escaleras). Sin embargo, en algunos casos se puede dar la planta octogonal debido a la influencia de la arquitectura gótica levantina, manteniendo la misma estructura. Un ejemplo sería la torre de Santa María de Tauste (fig 5).

Esta estructura de torre dentro de otra torre va a dar ventajas constructivas y estructurales respecto al subtipo anterior. Va a permitir reducir los espesores de los muros y en general el volumen de la obra; de ahí que se pudiera aumentar la altura de estas torres respecto a las primeras. Esto se debe a que al duplicar el muro, el momento de inercia aumenta considerablemente, aumentando la rigidez y obteniendo un pandeo menor.

Al encontrarse las escaleras entre ambas torres, van ser independientes de las salas que se desarrollan dentro de la torre interior, independizando el espacio de circulación del estancial, donde se crearán salas autónomas. Además, las escaleras van a participar como elemento estructural, dando estabilidad a la torre, y haciendo que el conjunto trabaje de forma solidaria. Aunque esto va a pasar en general con todos los elementos, estando todos bien integrados y participando en la tarea de sustentación (como por ejemplo los forjados).

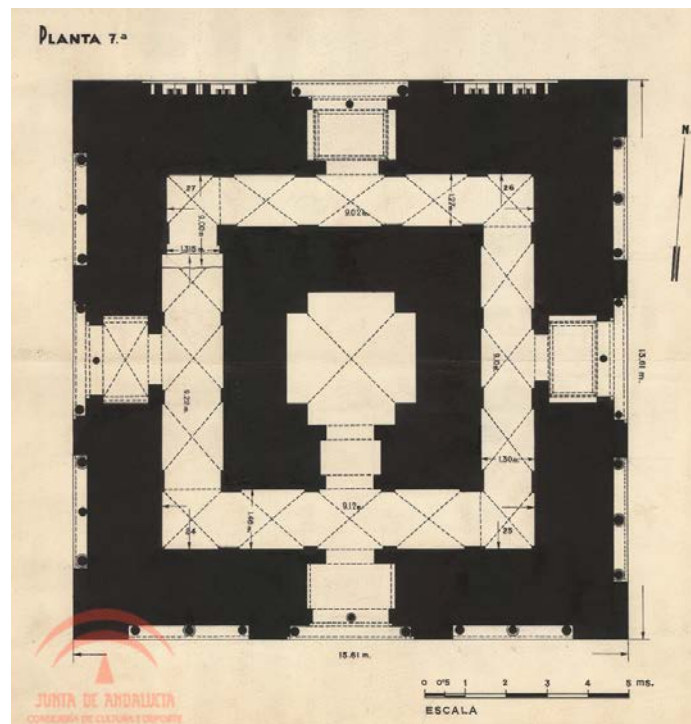


Fig.3 Planta del primer cuerpo de La Torre de la Giralda, Félix Hernández: "El alminar de Abd al-Rahman III en la Mezquita Mayor de Córdoba", Granada, 1975. Figura 11.

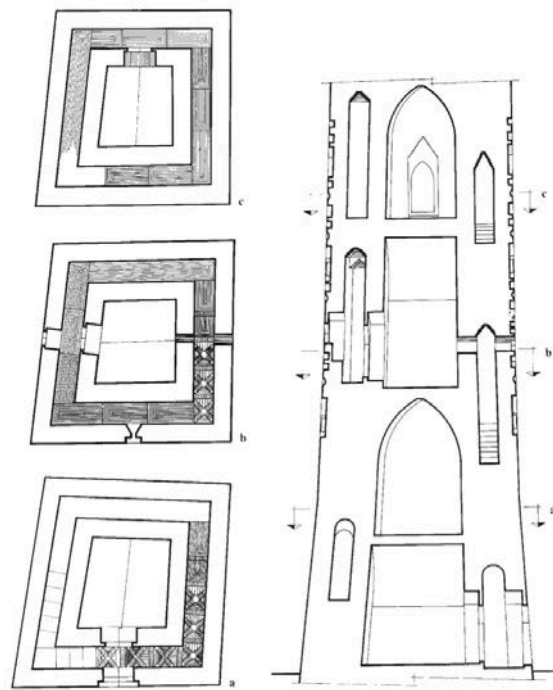


Fig.4 Plantas y sección de la Torre de Santa María de Ateca.
Borrás Gualis, G.M. 2006, "Estructuras mudéjares aragonesas".

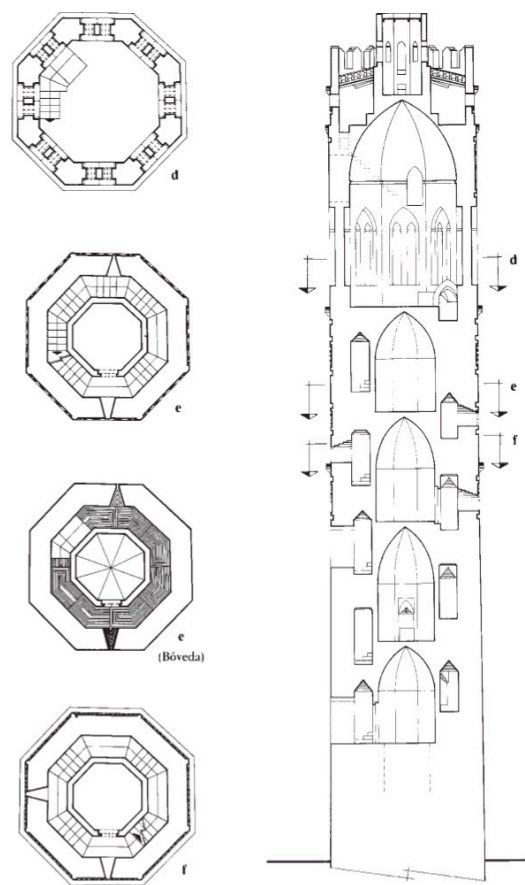


Fig.5 Plantas y sección de la Torre de Santa María de Tauste.
Borrás Gualis, G.M. 2006, "Estructuras mudéjares aragonesas".

4.3 Materiales: ladrillo y yeso.

Tanto el ladrillo como el yeso son los máximos representantes de la estética arquitectónica mudéjar, siendo de clara influencia islámica.

Estos dos materiales fueron los que posibilitaron las ventajas constructivas y estructurales que se encuentran en estas torres gracias a sus cualidades técnicas.

En primer lugar se tiene el ladrillo, un material de fácil fabricación, con unas dimensiones homogéneas y un tamaño y peso pequeños. Esto posibilita una gran manejabilidad en obra, requiriendo menos esfuerzo y consiguiendo un mayor rendimiento. Todo esto hace que sea un material más barato que los sillares y además consigue que las obras se construyan a mayor velocidad, pudiendo ser usado tanto para la parte estructural como la ornamental.

Por otro lado, el yeso va a ser el material que se use como conglomerante de las fábricas de ladrillo o como único material de muros y bóvedas. Este uso del yeso comenzó en Irán, extendiéndose por toda la cultura islámica y llegando con ella a la península en el siglo VIII. Se utilizará también en la estructura y en los ornamentos.

Gracias a la capacidad del yeso de absorber elásticamente deformaciones sin dejar de aportar toda su capacidad resistente, muchas construcciones con grandes desplomes y deformaciones han podido llegar hasta la actualidad sin grandes grietas. Además, otra característica positiva es la rapidez de fraguado y endurecimiento que tiene, facilitando la rapidez de ejecución. Sin embargo, puede ser poco estable ante la humedad permanente al ser muy higroscópico, aumentando de volumen pudiendo anularse su resistencia mecánica y coherencia.

Como se puede ver, ambos materiales ahorraban mucho tiempo en la construcción, además de crear estructuras homogéneas y monolíticas.

4.4 Función y simbología de las torres:

Las torres en la Edad Media significaban poder y, por tanto, tenían una clara intención de rivalidad y deseo de superación; de ahí que cada vez que se construía una torre, se intentaba que fueran más esbeltas y decoradas que las ya existentes. Por otro lado, también podían ser consideradas como el símbolo representativo de una comunidad concreta o colectivo, convirtiéndose en la identificación de la sociedad que la promovía, bien fuera una iglesia en concreto o una ciudad, por ejemplo. En resumen, eran la manifestación social de identidad de una población o comunidad, además de un hito dentro de la ciudad.

En Italia era muy normal encontrar torres con esta clara intención, siendo un claro ejemplo de esta competición por demostrar más poder que el resto, la ciudad de Bolonia (fig. 6). Sin embargo, en Italia lo que más abundaba eran las torres de carácter nobiliario o bien las vinculadas a gobiernos municipales, representando a la ciudad y compitiendo a través de ellas contra otras ciudades vecinas.



Fig.6. "Bologna ai tempi che vi soggiornò Dante", postal italiana de principios del siglo XX.
 Leeuwen, T.A.P. 1986, *The skyward trend of thought: the metaphysics of the american skyscraper*.

Si se va a las torres campanario, ligadas a la finalidad religiosa, otra función clara era la de sostener las campanas para la llamada a la oración. Pero la decoración de estas torres y su evolución en altura no se justifica sólo con esta función, también tenían esta búsqueda de entidad propia y ser el símbolo de, en este caso, la comunidad de la parroquia, y en general, de la ciudad donde se encuentran. Sin embargo si es cierto que cuanto mayor era la altura de las torres, mayores eran las posibilidades de que las campanas fueran oídas en toda la ciudad, de ahí que el cuerpo superior siempre esté abierto al exterior con unos vanos lo más grandes posibles.

5 LAS TORRES DE TERUEL:

La ciudad de Teruel guarda el conjunto arquitectónico mudéjar incluido en la Lista del Patrimonio de la Humanidad en el año 1986 por la UNESCO. Tiene una gran personalidad que lo diferencia de otros conjuntos y está formado por cuatro torres:

- La Torre de San Pedro (fig. 7).
- La Torre de La Catedral, Santa María Mediavilla (fig. 8).
- La Torre de San Martín (fig. 9).
- La Torre de El Salvador (fig. 10).



Fig. 7, Torre de San Pedro.



Fig. 8, Torre de La Catedral.



Fig. 9, Torre de San Martín.



Fig. 10, Torre de El Salvador.



Todas ellas se encuentran adosadas a las iglesias que les dan nombre y se dividen en dos grupos:

- a) Las torres de San Pedro y La Catedral serán las más antiguas (entorno al 1257-1258) y forman parte de las torres con estructura cristiana, explicadas anteriormente.
- b) Las torres de San Martín y El Salvador pertenecen a las torres con estructura de alminar y campanario superpuesto y fueron construidas en 1317 la primera, y poco después la segunda.

** A partir de este momento nos referiremos por grupo a o grupo b a estos dos grupos diferenciados a la hora de hablar de características concretas.*

En su momento hubo una torre más, la Torre de San Juan, construida en 1324 y derribada en el siglo XVIII. Se le llamaba "la hermosa" y era similar a las torres de San Martín y El Salvador. También se encuentra la Torre de La Merced, aún en pie, pero corresponde a un estilo tardío de mudéjar del siglo XVI, saliendo del tema de estudio de este trabajo.

Por supuesto, la función simbólica comentada en el punto 4.4 se encuentra presente en este conjunto. Además, mediante campanadas, daban la hora o avisaban de cualquier acontecimiento público, incluso de emergencias (toca a rebato), por lo que quedaban ligadas a la vida ciudadana de Teruel. Incluso servían de punto de vigilancia gracias a su altura, ya que no había edificios de más de tres alturas hasta el siglo XIX, sin olvidar que las torres de San Martín y El Salvador se encontraban al lado de puertas de la muralla que rodeaba la ciudad.

Todas ellas van a tener un paso inferior, siendo una de las características singulares de estas torres, formando de alguna manera un tipo de torre propio de la arquitectura mudéjar aragonesa. Esta característica hace que las torres se apoyen en dos machones sobre el suelo y no en todo el perímetro del muro, estando el pasaje cubierto con bóvedas de cañón apuntado, salvo en El Salvador (la última construida) que tiene una bóveda de ojivas.

En el momento en el que se construyeron, la ciudad no tenía gran cantidad de suelo disponible dentro de las murallas que la rodeaban, por lo que esta disposición era la más adecuada para poder levantar las torres. De esta forma, la visión de las torres es mejor que si estas siguieran la alineación de la calle.

Este modelo con paso inferior no existe dentro del mudéjar fuera de Teruel. Si es cierto que se identifica un paralelismo con algunas torres italianas contemporáneas a las de Teruel, como en el caso del Campanario de Caserta Vecchia (fig. 12) (Almagro Gorbea, 1991). Esta semejanza pudo darse por las posibles relaciones comerciales que se dieron entre Teruel e Italia gracias al comercio de la lana, la cual se producía de forma local en Teruel. No olvidar que el Reino de Nápoles fue conquistado por Alfonso V, rey de Aragón, en el siglo XV.



Fig. 12, Campanario de Caserta Vecchia, www.panoramio.com

Los materiales principales utilizados serán los ya comentados: el ladrillo (de 30x15x5cm) y el yeso como único aglomerante. El grupo a presenta un aparejo a soga, mientras que el b, a soga y tizón, alternando en vertical también, aunque la torre interior se encuentra construida en hormigón de yeso vertido en

encofrado de madera (fig. 13). Estos materiales han conseguido aguantar sin problemas aparentes las altas cargas de las torres, muy concentradas por la existencia del paso inferior.



Fig. 13, muro interior de la Torre de El Salvador.

Por otro lado, la decoración se realizó con cerámica vidriada, dotándolas de una singularidad cromática, que junto a su volumetría, las reafirma como hitos arquitectónicos de la ciudad de Teruel.

En cuanto a la estructura que sostiene las campanas, está realizada en madera, ya que amortigua las vibraciones producidas por estas.

Un dato a tener en cuenta es la rápida ejecución de las torres: en tan sólo un año conseguía levantar una de ellas, gracias a las características de los materiales utilizados (punto 4.3) y contrariamente a la forma habitual de construcción en la Edad Media, donde se solía construir por fases, pudiendo corregir en cada una los errores de la anterior (punto 3). Sin embargo, este hecho puede ser, según A. Almagro Gorbea (1991), una de las causas de inclinación de las torres, afirmando que todas ellas presentan desplomes hacia el sur o suroeste. La razón es que estas caras son las más expuestas al sol, por lo que secaban con mayor rapidez y el yeso tenía una retracción mayor. Se estudiará más adelante cada torre en concreto, viendo que realmente los desplomes no son siempre hacia ese lado (punto 7).

5.1 Cimentaciones de las torres y el suelo turolense:

La cimentación utilizada es superficial en todos los casos. Está formada por zapatas corridas de rellenos de cimentación muy duros y firmes, cementados con mortero y cal (bloques y argamasa calcárea), y sus dimensiones no son superiores al ancho del muro, salvo en algunas zonas donde pueden llegar a tener vuelos de entre 25 y 50 centímetros. La cota de apoyo variará entre -0,30 metros y 3,50 metros.

Si a esto se le suma la existencia del paso inferior, la cual hace que la superficie de apoyo sea menor que el perímetro total de la torre, se encuentra tensiones muy elevadas en las bases de estas zapatas, como se podrá ver en los dossiers específicos de cada torre.

Es aquí donde se ve una de las características comentadas de las cimentaciones medievales (punto 3.1), donde las dimensiones de las zapatas no se calculaban, y se llevaban hasta donde el resto de edificaciones permitían. Es más, varias de las intervenciones que han sufrido han ido dirigidas o tienen relación con aumentar la superficie de apoyo para obtener un mayor reparto de las cargas (punto 5.2).

El clima de la ciudad de Teruel es generalmente seco, y las lluvias no son persistentes, lo cual no afecta al ladrillo sobre rasante. Sin embargo, en el pie de las torres, el efecto de la humedad por capilaridad y el salpiqueo del agua de lluvia más el efecto de las heladas ha perjudicado considerablemente y en varias ocasiones las zonas inferiores del ladrillo, donde este apoya sobre la cimentación, poniendo en peligro la estabilidad de la torre. El mejor ejemplo de este problema es la Torre de San Martín, como se verá más adelante.

Los vientos no son excesivamente perjudiciales en esta zona de Aragón, por lo que aunque la cimentación sea superficial, el viento no será la causa principal de las notables inclinaciones de las torres turolenses.

5.1.1 Materiales que forman el suelo de cimentación:

Los datos que se tienen del suelo son de los primeros 10 metros de profundidad, la que será principalmente la zona de influencia de las torres.

Se va a encontrar tres materiales fundamentalmente:

- a) Rellenos de echadizos y rellenos naturales: adosados siempre a las cimentaciones y nunca como nivel de apoyo de estas.
- b) Gravas semicementadas o pizorra (nombre local): es un material duro y firme y aparecerá alternado con el siguiente material. Se considerará como el firme adecuado para cimentar.
- c) Arcillas de color rojo: son de elevada consistencia, poca expansividad y baja plasticidad. También podrán ser consideradas como firme. Al ser arcilla puede haber probabilidad de alterabilidad con la humedad o la intemperie.

Un dato positivo es la no presencia de nivel freático. Además, estos suelos se encuentran exentos de presencia de sulfatos, por lo que no es un factor que haya influido en la inclinación de las torres. De ser así, podrían haber afectado a los materiales utilizados en la cimentación, favoreciendo la inclinación de las torres.

En resumen, se puede ver que este suelo es duro y no debería ser el principal causante de los asentamientos en las torres en condiciones normales. Sin embargo, A. Almagro Gorbea (1991), destaca la mala calidad de los suelos sobre los que asientan las torres, generando deformaciones e inclinaciones. También autores como Mariano Navarro Aranda (1954) y Ricardo García Guereta (1926), Por esta razón y ante las grandes tensiones que se producen en los apoyos, se va a comprobar que no superen las admitidas por el terreno (dossiers en punto 7).

A continuación se encuentra la explicación dada por A. Almagro Gorbea (1991) sobre las inclinaciones de las torres:

“La inclinación producida durante el proceso de construcción...” (rápida construcción de las torres e inclinación por retracción del yeso usado como aglomerante)... “se vería después aumentada por un mayor asiento del terreno por ese lado, provocado por el desplazamiento del centro de gravedad generado por la misma inclinación. Así el proceso de inclinación continuaría hasta alcanzar una situación de equilibrio entre carga y deformación del terreno. Tanto las torres de Teruel como la casi totalidad de las torres aragonesas construidas con ladrillo y yeso presentan inclinación en la misma dirección.”

5.2 Intervenciones sufridas:

Aparte de las intervenciones específicas que ha sufrido cada torre, como por ejemplo recalces (punto 7) se encuentran dos intervenciones que aparecen en todas las torres:

- Las jambas de paso están revestidas de sillares, de estilo clásico, por la descomposición de la fábrica de ladrillo producida por la humedad de capilaridad ascendente del suelo y el salpiqueo del agua de lluvia, más el efecto de las heladas y por la erosión producida por la circulación de la gente a través del paso.
- Restauración tras la Guerra Civil, donde gran parte de las fachadas se vio afectada, sobre todo la decoración de cerámica vidriada. Fue en torno a 1950, gracias al Patrimonio Artístico Nacional y a manos de Manuel Lorente Junquera.

5.2.1 Recalce de la Torre de San Martín:

Una de las actuaciones más comentadas sobre estas torres es el recalce que sufrió la Torre de San Martín entre los años 1549 y 1551, llevada a cabo por Pierres Vedel, un gran profesional e ingeniero de la época.

Este gran alarde técnico se describe de forma detallada en el dossier de esta torre (punto 7.3, “Rehabilitaciones e intervenciones sufridas”), sin embargo hay que destacar que esta solución fue muy habitual durante esta época, apareciendo también en la Torre de El Salvador.

Fuera de Teruel hay ejemplos como el de la Basílica de San Martín de Mondoñedo (figura 14) en Foz, Lugo, o bien el Castillo de Les Sitges (figura 15), en Lérida.



Fig. 14, San Martín de Mondoñedo; Chamoso Lamas, M. 1979.



Fig. 15, Castillo de Les Sitges; habitantesdelanada.blogspot.com

6 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE TENSIONES Y ASIENTOS:

Para cada torre se han realizado los siguientes cálculos:

- Peso estimativo, total y el correspondiente a cada apoyo.
- Tensiones de trabajo de las zapatas, es decir, la tensión que están transmitiendo las zapatas a los diferentes estratos.
- Las tensiones admisibles de los diferentes estratos.
- El asiento producido por los apoyos sobre el terreno.
- Tensión de la fábrica de ladrillo.

A continuación se explica cómo se ha calculado cada uno de estos valores.

6.1 Peso estimativo:

Para calcular el peso de la torre se ha hallado el volumen o bien la superficie del ladrillo, de los forjados, de las bóvedas y cubierta, y del contrafuerte de caliza (si corresponde).

Este dato se ha multiplicado por el peso específico del elemento (KN/m^3) o bien por su peso por cada metro cuadrado (KN/m^2) según el dato que se esté manejando.

Tanto los datos del ladrillo, de los forjados y de las bóvedas y cubierta se han obtenido del libro “Las torres de Teruel” (1926) de Ricardo García Guereta, ya que al haber realizado la restauración de la Torre de San Martín en esa época, se entiende que son datos reales, además de incluir una hipótesis de sobrecarga de uso. Los datos son los siguientes:

- Ladrillo de tejar: 16 KN/m^3
- Piso-madera: 3 KN/m^2
- Bóvedas y cubierta: 2 KN/m^2

Estos pasos se han seguido para cada apoyo de la torre, sumando después los dos resultados para obtener el peso total.

6.2 Tensiones de trabajo:

Para el primer estrato, es decir, para el estrato sobre el que apoya la zapata tenemos la siguiente expresión para la tensión de trabajo q_{b0} :

$$q_{b0} = \frac{P \text{ (KN)}}{B \times L} = \left(\frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \right)$$

P será el peso correspondiente a ese apoyo en KN, mientras que B será la longitud del lado corto, en metros, y L la longitud del lado largo, en metros también (figura 16).

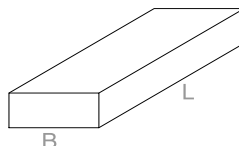


Fig. 16

Para los estratos siguientes, hay que sacar los lados B y L equivalentes, ya que irán siendo mayores en función del ángulo de rozamiento interno del estrato (ϕ) y por tanto la superficie será mayor y las tensiones menores (las cargas se distribuyen hasta dejar de tener efecto sobre el terreno).

Los valores de ϕ tomados son:

- 42 ° para la pizarra y arenas.
- 22 ° para las arcillas rojas.

Por tanto, las nuevas longitudes serán:

$$L' = L + 2 \times h \times \operatorname{tg}(\phi) = (\text{m})$$

$$B' = B + 2 \times h \times \operatorname{tg}(\phi) = (\text{m})$$

Siendo h el espesor del estrato (ver figura 17).

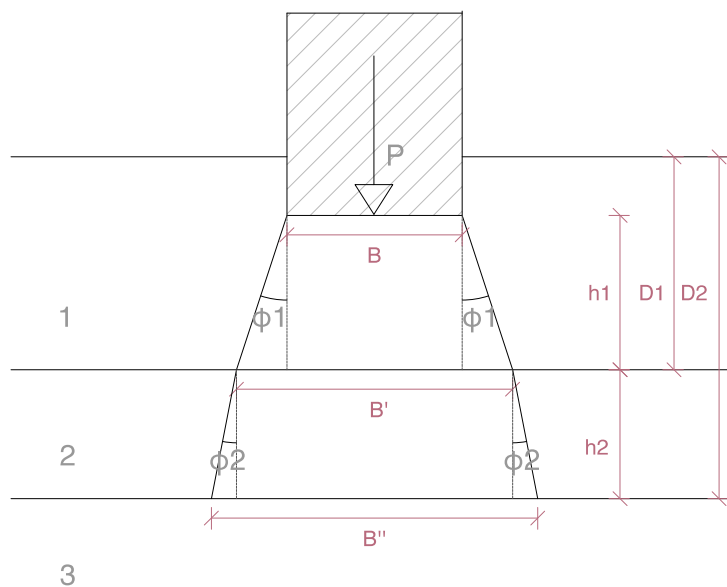


Fig. 17

Por tanto, como ejemplo, el estrato 3 de la figura 7, estaría recibiendo una tensión de trabajo de:

$$q_{b3} = \frac{P}{B'' \times L''} = \left(\frac{\text{KN}}{\text{m}^2} \right)$$

con:

$$B'' = B' + 2 \times h_2 \times \operatorname{tg}(\phi_2) = (\text{m})$$

$$L'' = L' + 2 \times h_2 \times \operatorname{tg}(\phi_2) = (\text{m})$$

Este proceso se lleva a cabo con todos los estratos, para poder comparar el dato con la tensión admisible de ese estrato (punto 6.3).

6.3 Tensiones admisibles del suelo:

En el caso de las arcillas rojas, se ha tomado para comparar con la tensión de trabajo un valor

aproximado que es el de la resistencia a compresión simple q_u (KN/m²), tomada del estudio geotécnico (1991) utilizado para el trabajo.

En el caso de la pizorra y de las arenas, se ha tomado del estudio el valor del N_{spt} (nº de golpes para hincar 30 cm de un cilindro hueco de dimensiones normalizadas, ensayo de penetración estándar) para poder hallar su tensión admisible q_{adm} (KN/m²) con la siguiente expresión:

$$q_{adm} = 8 \times N_{spt} \times \left(1 + \frac{D}{3L}\right) \times \left(\frac{L + 0,3}{L}\right)^2 = \left(\frac{KN}{m^2}\right)$$

Siendo D la distancia en metros desde el comienzo del suelo hasta el inicio del estrato del que queremos hallar la tensión admisible (ver figura 17). La longitud L vuelve a ser el lado largo de la zapata en metros (figura 16).

6.4 Asientos:

Encontramos dos tipos de modelos para el cálculo elástico de asientos:

- a) Capa elástica sobre base rígida.
- b) Capa elástica indefinida.

El primer caso se va a utilizar para los estratos intermedios, considerando el inferior como base rígida. El segundo caso se utilizará para el último estrato, por no tener ningún estrato inferior que actúe como capa rígida.

6.4.1 Capa elástica sobre base rígida:

La expresión para el cálculo de asientos en milímetros utilizada será la siguiente:

$$s = \frac{2 a q (1 - \nu^2)}{E} K_0$$

El dato a es el semilado corto de la zapata (la mitad de B en la figura 16) y q es la tensión de trabajo que transmite la zapata al comienzo del estrato.

Para ν , el coeficiente de Poisson del suelo, se tomará 0,3, siendo un valor comúnmente utilizado. E consiste en el módulo elástico del estrato correspondiente, tomado de la tabla D.23 del *DB-SE Cimientos* (figura 18) en función del N_{spt} (arenas y pizorra) o bien de la q_u (arcillas), según el dato que tengamos del estrato.

Tabla D.23. Valores orientativos de N_{SPT} , resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad de suelos

Tipo de suelo	N_{SPT}	q_u (kN/m ²)	E (MN/m ²)
Suelos muy flojos o muy blandos	< 10	0 - 80	< 8
Suelos flojos o blandos	10 - 25	80 - 150	8 - 40
Suelos medios	25 - 50	150 - 300	40 - 100
Suelos compactos o duros	50 - Rechazo	300 - 500	100 - 500
Rocas blandas	Rechazo	500 - 5.000	500 - 8.000
Rocas duras	Rechazo	5.000 - 40.000	8.000 - 15.000
Rocas muy duras	Rechazo	> 40.000	>15.000

Fig. 18 Tabla D.23 tomada del DB-SE Cimientos.

El valor K_0 se obtiene de la siguiente tabla:

Asiento en el centro de la carga. Valores del coeficiente K								
Relación h/a	Círculo de radio a	Rectángulo (m = b/a)						Faja infinita
		m = 1	m = 1,5	m = 2	m = 3	m = 5	m = 10	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,2	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
0,5	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
1	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51
2	0,72	0,77	0,85	0,87	0,88	0,88	0,88	0,88
3	0,81	0,88	1,00	1,07	1,12	1,13	1,13	1,13
5	0,89	0,98	1,14	1,24	1,36	1,44	1,45	1,45
7	0,92	1,02	1,20	1,32	1,47	1,60	1,64	1,65
10	0,94	1,05	1,25	1,39	1,56	1,75	1,87	1,88
∞	1,00	1,12	1,36	1,52	1,78	2,10	2,53	∞

Fig. 19 Mecánica del suelo y cimentaciones, F. Muzás Labad, 2007.

Se elegirá mediante h/a, donde h es la distancia hasta la capa considerada rígida (la siguiente, h del estrato en la figura 17), y mediante m, que se halla con la expresión:

$$m = b/a$$

donde b es el semilado largo de la zapata (la mitad de L en la figura 16) y a, como ya se ha comentado, el semilado corto de la zapata (la mitad de B en la figura 16).

6.4.2 Capa elástica indefinida:

En este caso se procederá de la misma forma que antes, con la misma fórmula para s. Lo único que cambia es la forma de obtener K_0 , para la que se utiliza la tabla de la figura 20. Sólo hará falta hallar m para obtener el valor de K_0 .

Forma de la carga m = b/a	Valores de K_0		
	Centro	V. medio	Carga rígida
Cuadrada: 1,0	1,12	0,95	0,88
Rectangular: 1,5	1,36	1,15	1,08
2,0	1,53	1,30	1,22
3,0	1,78	1,53	1,44
4,0	1,96	1,70	1,61
5,0	2,10	1,83	1,72
6,0	2,23	1,96	
7,0	2,33	2,04	
8,0	2,42	2,12	
9,0	2,49	2,19	
10,0	2,53	2,25	2,12
20,0	2,95	2,64	
30,0	3,23	2,88	
40,0	3,42	3,07	
50,0	3,54	3,22	
100,0	4,00	3,60	
Circular: D = 2a	1,00	0,85	0,79

Notas: En la esquina de una carga rectangular, $K_0 = 0,5 K_0$ en el centro.
En el borde de una carga circular, $K_0 = 0,64$

Fig. 20 Mecánica del suelo y cimentaciones, F. Muzás Labad, 2007.

6.5 Tensión de la fábrica de ladrillo:

Para poder saber si la fábrica de ladrillo se encuentra a una tensión mayor de lo que puede aguantar, se ha hallado la tensión a la que está dividiendo la carga por la sección del muro.

La tensión admisible, al no tratarse de unos materiales actuales, se ha recurrido a la siguiente expresión, sacada de *“Arcos, bóvedas y cúpulas: geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica”* de S. Huerta Fernández:

$$\sigma_f = \frac{1}{3} \sigma_l + \frac{2}{3} \sigma_m$$

siendo σ_f la tensión admisible de la fábrica, σ_l la del ladrillo y σ_m la del mortero. Para σ_l se tomará 10 mientras que para σ_m se tomará 5, todos datos obtenidos del texto anteriormente citado. El resultado es 6,67 N/mm² al que hay que dividir entre el coeficiente de seguridad, entre 4 y 8.


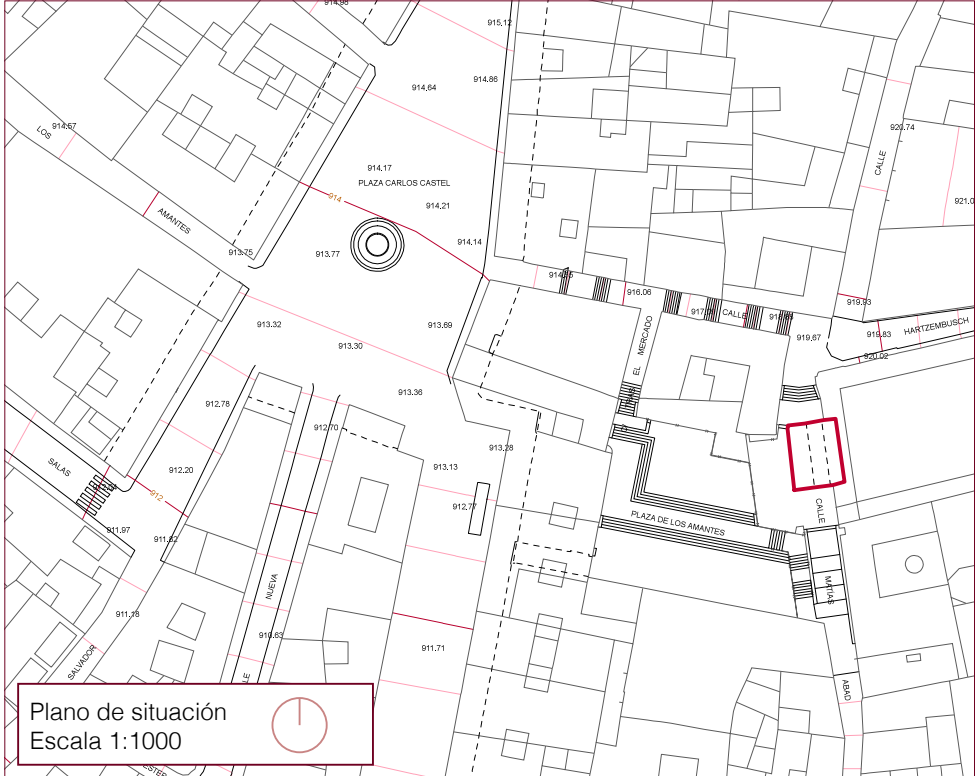
Finalmente la tensión admisible del ladrillo tomada para comprobar será de 1000 KN/m².






7 DOSSIERS:

A continuación se encuentra un dossier específico para cada torre, donde se detallarán los siguientes datos:

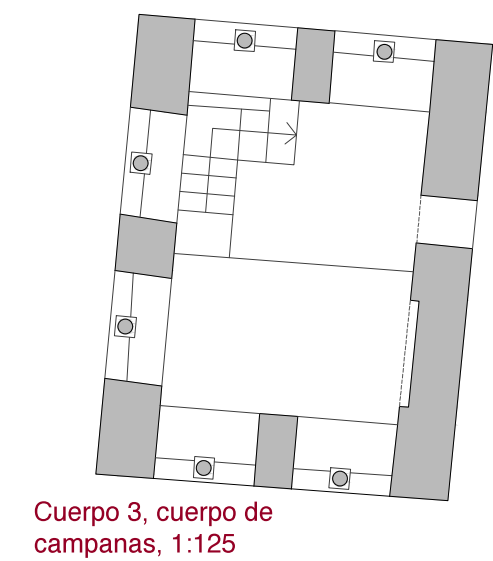
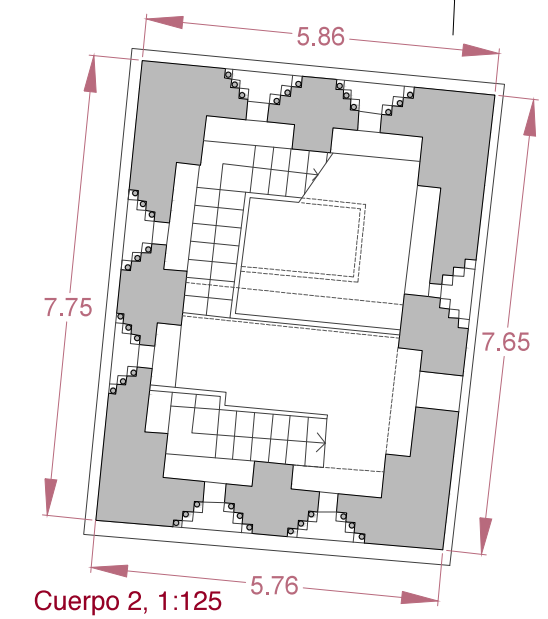
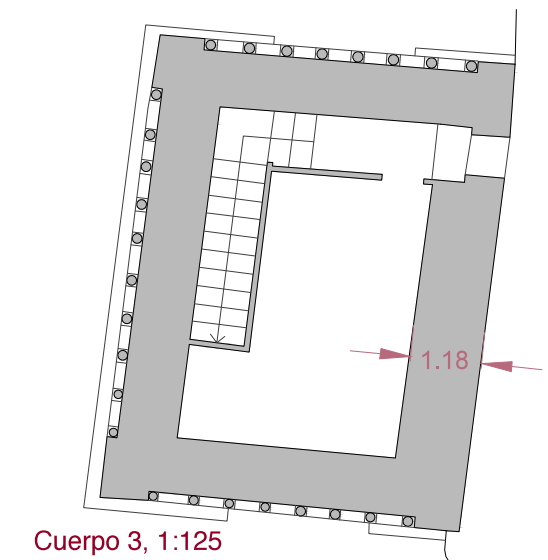
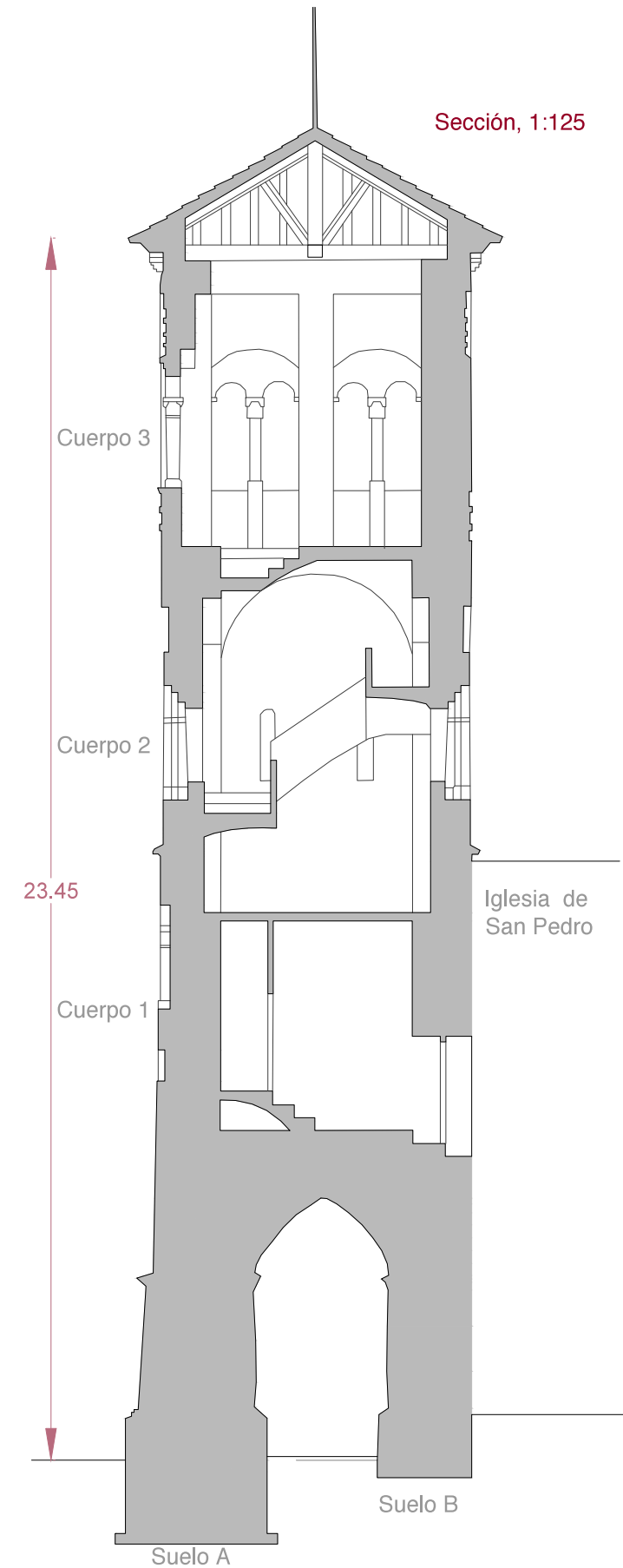
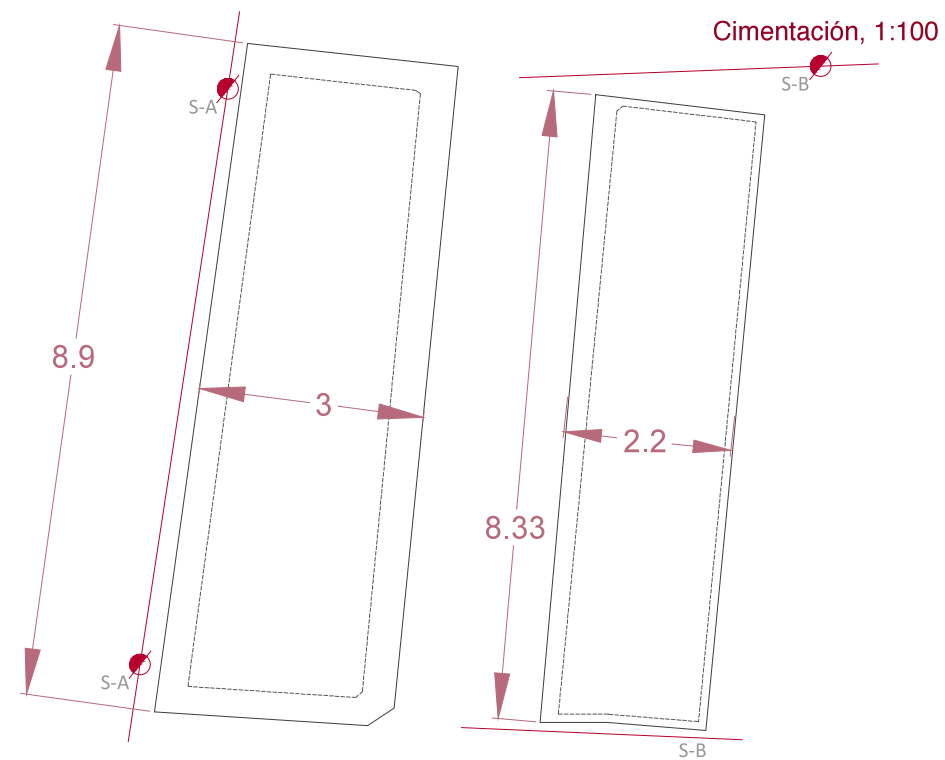
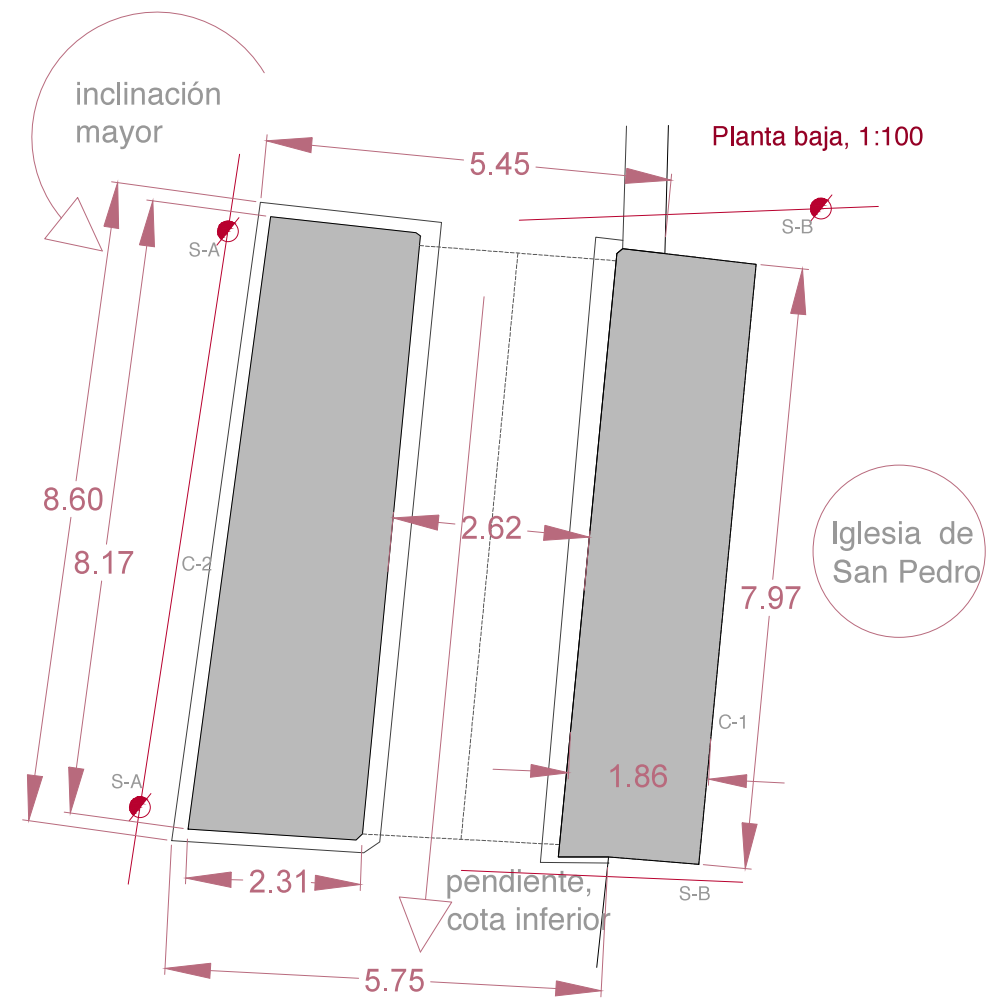
- Fecha de construcción.
- Tipo de torre.
- Situación.
- Altura, nº de cuerpos.
- Peso.
- Características propias y defectos observados.
- Rehabilitaciones e intervenciones sufridas.
- Planos generales.
- Cimentaciones.
- Suelo.
- Cálculos de asientos, tensión en la fábrica, desplome (si procede).
- Conclusiones específicas de cada torre.

7.1 TORRE DE SAN PEDRO:

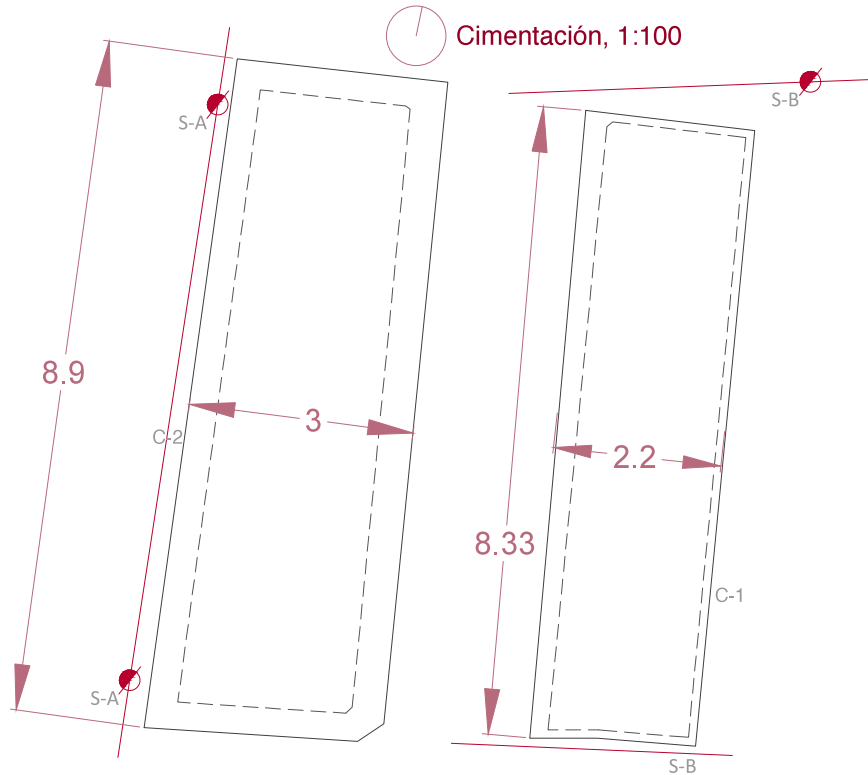
Fecha de construcción	Es la más antigua de todas, poco anterior a la Torre de La Catedral, construida entre 1257 y 1258. De ahí que sea la más sencilla y pequeña.
Imagen	 <p>Fig 7.1.1, Exterior de la Torre de San Pedro.</p>
Tipo de torre	Pertenece al grupo de las torres con estructura cristiana, considerada por algunos autores de estilo románico (ver punto 4.2.1).
Situación	Adosada a los pies de la Iglesia de San Pedro en su apoyo este. El apoyo oeste es exento (se eliminaron las construcciones de este lado).
	 <p>Plano de situación Escala 1:1000</p>
Altura, nº de cuerpos	23,45 metros hasta la bocateja. Paso inferior más 3 cuerpos (3 plantas al interior, 2 normales más el cuerpo de campanas).
Peso	10.924,42 KN

Características propias y defectos observados	Es la más austera y sencilla.		Paso inferior con bóveda de cañón apuntado. se encuentra enfoscado con yeso, por lo que ha debido de pasar varios arreglos, ya que el original tenía el ladrillo descubierto.	
	Planta rectangular y muy deformada (ver planos).			
	Jambas de paso revestidas de sillares, moldura clásica, por lo que es muy posterior. Para reparar el deterioro de los ladrillos.		Se encuentran desperfectos en la bóveda.	
	Estos sillares aparecen como una corteza exterior y se encuentran abombados. Puede ser por estar sobrecargada, ya que su sección es muy pequeña (es un revestimiento), y parte de las cargas las aguanta la piedra. También la piedra tiene mayor rigidez que el ladrillo que se encuentra detrás, por lo que deforma mucho más.			
<u>Material de los sillares</u> : Caliza no muy compacta de origen local.	Fig 7.1.2, Paso inferior.			Marcas en el primer cuerpo de anteriores edificaciones en la fachada oeste.
Base del apoyo exento (oeste) con mayor superficie que el muro, en forma de talud (aumenta superficie de apoyo).				
Tiene un saliente similar en el lado adosado a la iglesia.	Por este lado la torre no estaba exenta.			
Ladrillos repuestos en la base. Estos ladrillos al ser más nuevos tienen un efecto de lavado.		Fig 7.1.3 Paso inferior.		
Rehabilitaciones e intervenciones sufridas	Ladrillos repuestos en la base. Estos ladrillos al ser más nuevos tienen un efecto de lavado.		Fig 7.1.4 Base del apoyo exento.	Cubierta reciente a 4 aguas, sustentada por 4 vigas en las limas y parecillos formando los faldones. Las cerchas de madera que forman la cubierta apoyan en el muro perimetral, donde aparecen machones (ver planos).
	Fig 7.1.5 Desperfectos de la bóveda.		Fig 7.1.6 Detalle fachada oeste.	1º cuerpo: ciego, sin aberturas.
	Fig 7.1.6 Detalle fachada oeste.			
	2º cuerpo: con 2 ventanas con arquivoltas por lado, machones en esquinas y centro que vuelven a unirse formando el muro perimetral.		Fig 7.1.7 Fachada oeste desde la Plaza de los Amantes.	3º cuerpo: cuerpo de campanas. Aparecen 8 machones, 4 en las esquinas y 4 en el centro de cada lado.
	Forjados de vigas de madera de pino apoyadas en el muro perimetral.			
	El muro y los forjados son de materiales diferentes; sistema heterogéneo.		Fig 7.1.7 Fachada oeste desde la Plaza de los Amantes.	Forjado del cuerpo de campanas sobre arco de medio punto que apoya sobre dos machones centrales (en segundo cuerpo).
	Forjado del cuerpo de campanas sobre arco de medio punto que apoya sobre dos machones centrales (en segundo cuerpo).			
	Diferencia de cota de 10 metros entre la base de apoyo de la Torre de San Pedro y la Plaza de los Amantes.		Fig 7.1.7 Fachada oeste desde la Plaza de los Amantes.	El desnivel se encuentra a 5 metros del pie oeste.
	El desnivel se encuentra a 5 metros del pie oeste.			
	Revestimiento con sillares de las jambas del paso.		Fig 7.1.7 Fachada oeste desde la Plaza de los Amantes.	Refuerzos en la base del apoyo exento, en ladrillo, con forma de talud. Se retiraron las edificaciones de este lado.
	Repetidas reformas y añadidos (bóveda).			
	1795, se añadió un cuerpo ajeno al estilo.		Fig 7.1.7 Fachada oeste desde la Plaza de los Amantes.	En 1873 un rayo incendió el tejado, por lo que sufrió otra restauración.
	En 1873 un rayo incendió el tejado, por lo que sufrió otra restauración.			
	En la última restauración (después de la Guerra Civil Española) se quitó el cuerpo superior añadido. También se quitaron otros postizos y se devolvieron a su sitio detalles que habían quedado dispersos o tapiados.		Fig 7.1.7 Fachada oeste desde la Plaza de los Amantes.	En la última restauración (después de la Guerra Civil Española) se quitó el cuerpo superior añadido. También se quitaron otros postizos y se devolvieron a su sitio detalles que habían quedado dispersos o tapiados.
	En la última restauración (después de la Guerra Civil Española) se quitó el cuerpo superior añadido. También se quitaron otros postizos y se devolvieron a su sitio detalles que habían quedado dispersos o tapiados.			

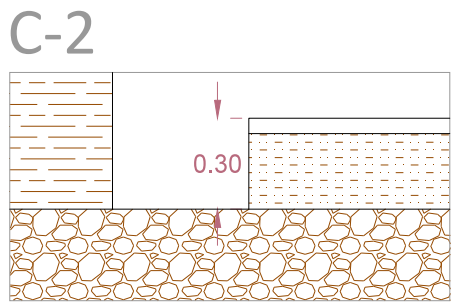
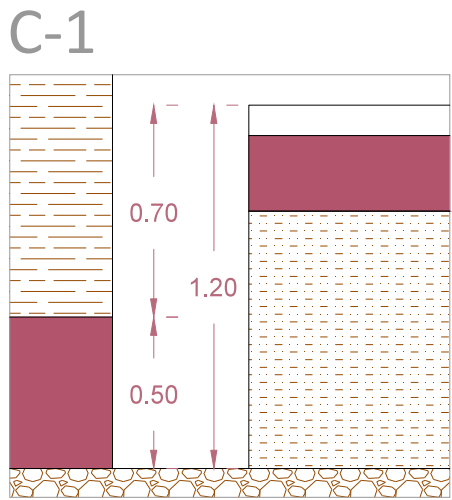
Planos



Cimentaciones
y suelo

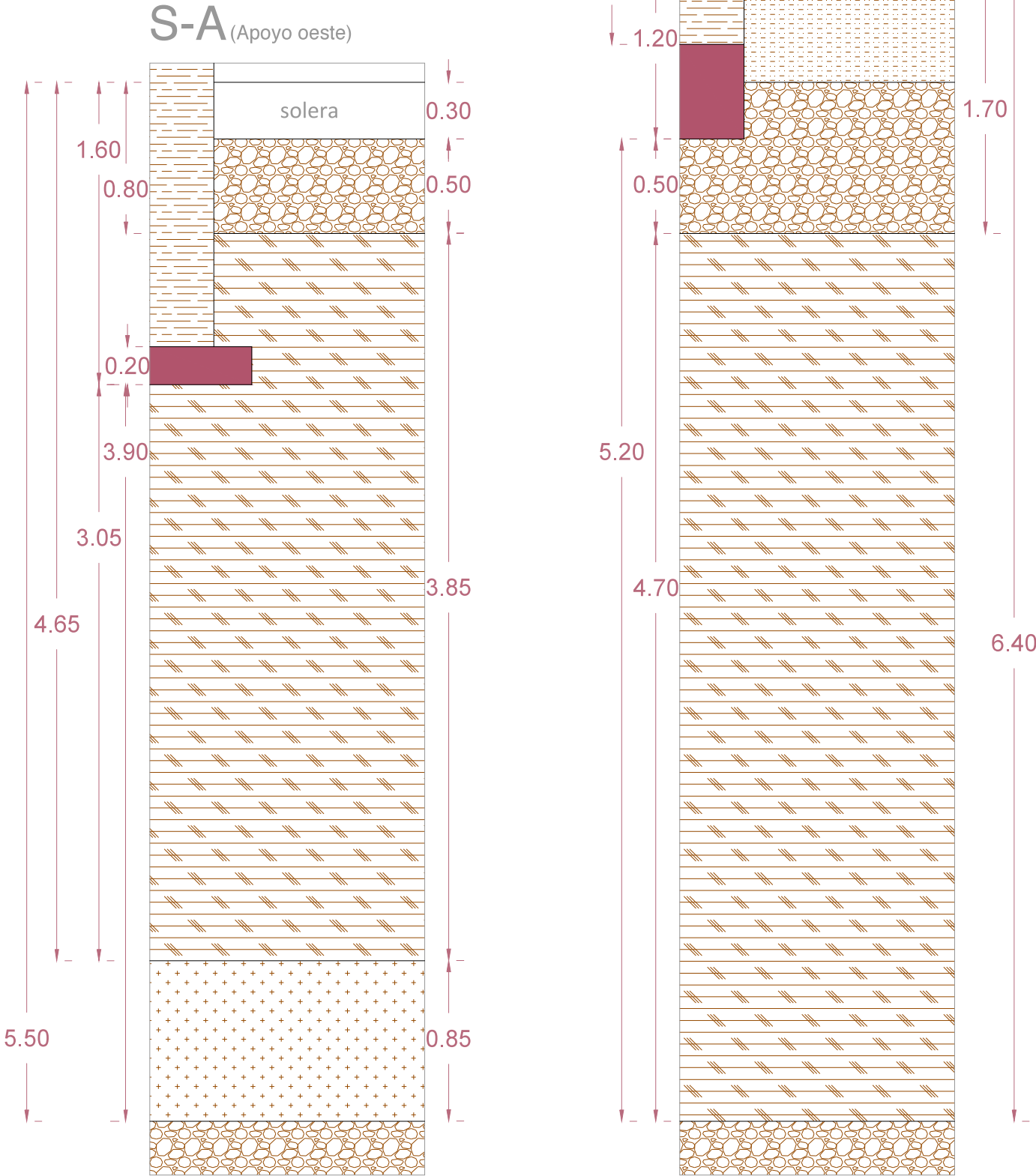


- Cimentación de la torre
- Pizorra
- Arcillas de baja plasticidad rojas
- Arenas cementadas
- Rellenos
- Restos de huesos humanos
- C-Calicatas
- S-Suelo



Calicatas, 1:25

Secciones del suelo afectado por la
torre, 1:30



Cálculos realizados

Lado oeste	Volumen/2 (m3)	KN//m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	282,92	16			4526,78
piso-madera			80,72	3	242,16
bóvedas y cubierta			27,4	2	54,8
contrafuerte caliza	15,27	28			427,42
TOTAL					5251,16

Lado oeste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D (m)	q adm
h=1,60			3	8,9		26,7	196,67	306,2	sobre arcillas marrón rojiza con arena		1,2	
h=1,60+3,05	3,05	arcillas	5,46	11,36	22	62,10	84,56		sobre arenas cementadas	50	4,65	478,87
h=1,60+3,90	0,85	cementada s	7,00	12,90	42	90,21	58,21		sobre pizorra	50	5,5	478,37

Lado este	Volumen/2 (m3)	KN//m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	282,9236	16			4526,78
piso-madera			80,72	3	242,16
bóvedas y cubierta			27,4	2	54,8
contrafuerte caliza	7,84	28			219,52
TOTAL					5043,26

Lado este	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=1,2			2,2	8,33		18,326	275,20		sobre pizorra	50	1,2	449,95
h=1,20 + 0,5	0,5	pizorra	3,10	9,23	42	28,62	176,23	306,2	sobre arcillas marrón rojiza con arena		1,7	
h=1,20 + 5,2	4,7	arcillas	6,90	13,03	22	89,87	56,12		sobre pizorra	50	6,4	487,18

TENSIÓN EN LA FÁBRICA DE LADRILLO	Superficie (m2)	Carga (KN)	Tensión (KN/m2)	Tensión admisible para la fábrica (KN/m2)
Lado oeste	18,87	5251,16	278,24	1000
Lado este	14,82	5043,26	340,20	1000

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
arcillas	3,05	3	8,9	196,67	2,97	2,03	0,88	100000	4,7248618	
arenas cementadas	0,85	5,46	11,36	84,56	2,08	0,31	0,15	100000	0,63071779	
pizorra	-	7,00	12,90	58,21	1,84	-	1,46	100000	5,41027874	10,77

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	0,5	2,2	8,33	275,20	3,79	0,45	0,25	100000	1,37736027	
arcillas	4,7	3,10	9,23	176,23	2,98	3,03	1,09	100000	5,41948889	
pizorra	-	6,90	13,03	56,12	1,89	-	1,5	100000	5,28393785	12,08

Conclusiones específicas

La torre gira respecto a su apoyo oeste, encontrándose inclinada hacia este punto.

La razón de este giro no es el suelo, ya que ningún estrato recibe una tensión de trabajo superior a su tensión admisible. Además, los asientos que se pueden producir debido al suelo no concuerdan con el giro, ya que el apoyo este tendría un asiento 2 milímetros superior al del apoyo oeste. Este asiento mayor en el pie junto a la iglesia se debe a que apoya en una cota superior al contrario, encontrando mayor profundidad de estrato compresible.


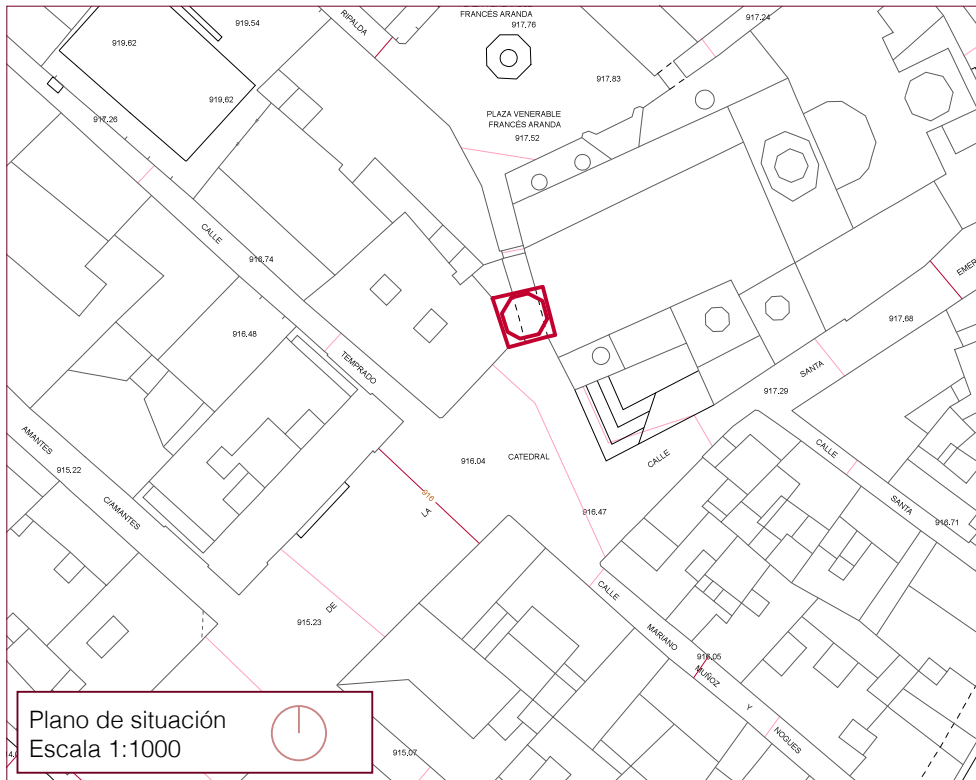
La iglesia de San Pedro es abovedada, pero al ser reciente (siglo XX) no se considera que pueda estar transmitiendo empujes hacia la torre.







Por otro lado, se encuentra la Plaza de los Amantes a una cota inferior de 10 metros respecto al plano de apoyo de la torre, a 5 metros del apoyo oeste. Se sabe que en el momento de la construcción, este lado estaba rodeado de otras edificaciones. Quizás tuvieron que quitarse por problemas de ladera y se reforzó con el talud existente y el aumento de base el apoyo de la torre. Sin embargo no parece ser suficiente, que junto al empuje que produce la iglesia de San Pedro sobre la torre, puede ser el causante de este desplome.

En cuento al abombado del revestimiento de piedra caliza del paso inferior, se asocia a una diferencia de rigideces entre este material y el ladrillo.

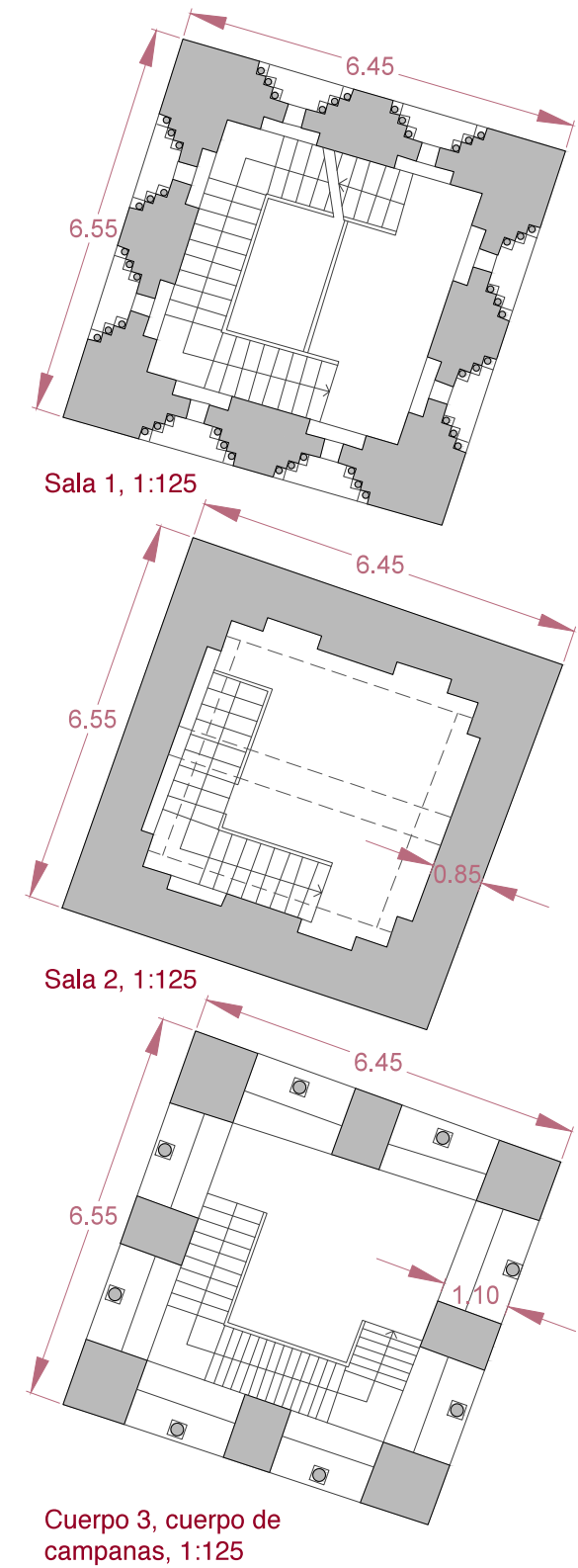
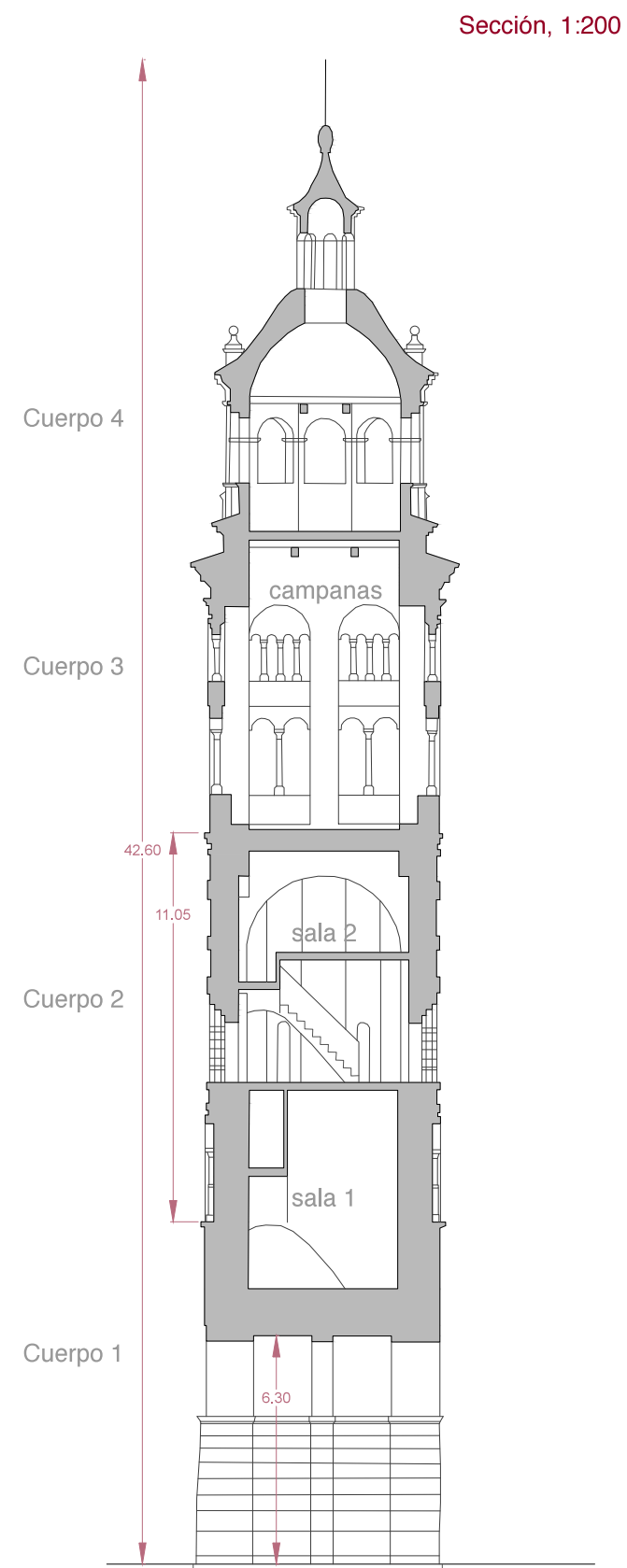
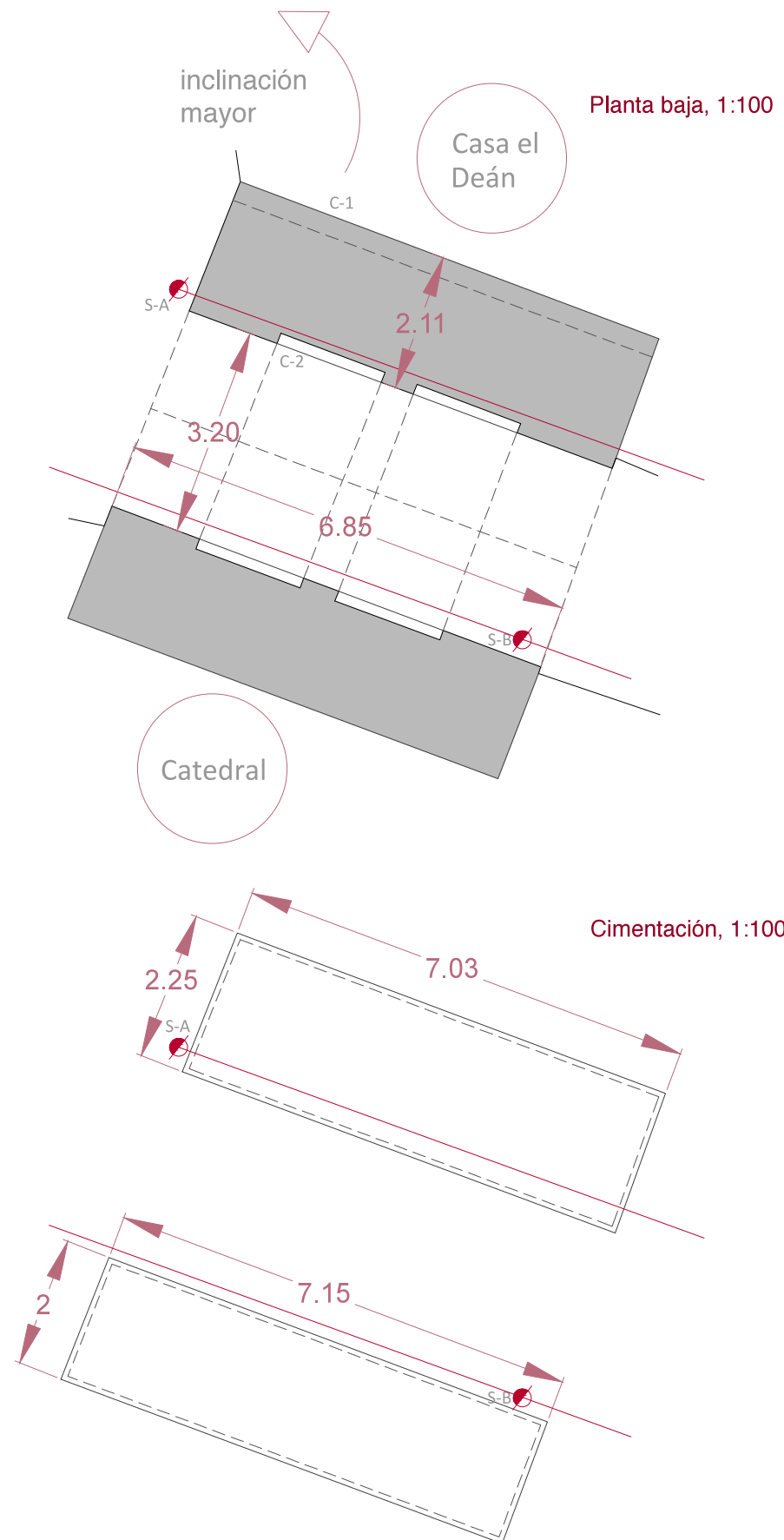
La fabrica no se encuentra sobretensionada, no siendo motivo de los problemas de la torre, aunque sí es cierto que se encuentra muy deteriorada.

7.2 TORRE DE LA CATEDRAL, SANTA MARÍA MEDIAVILLA:

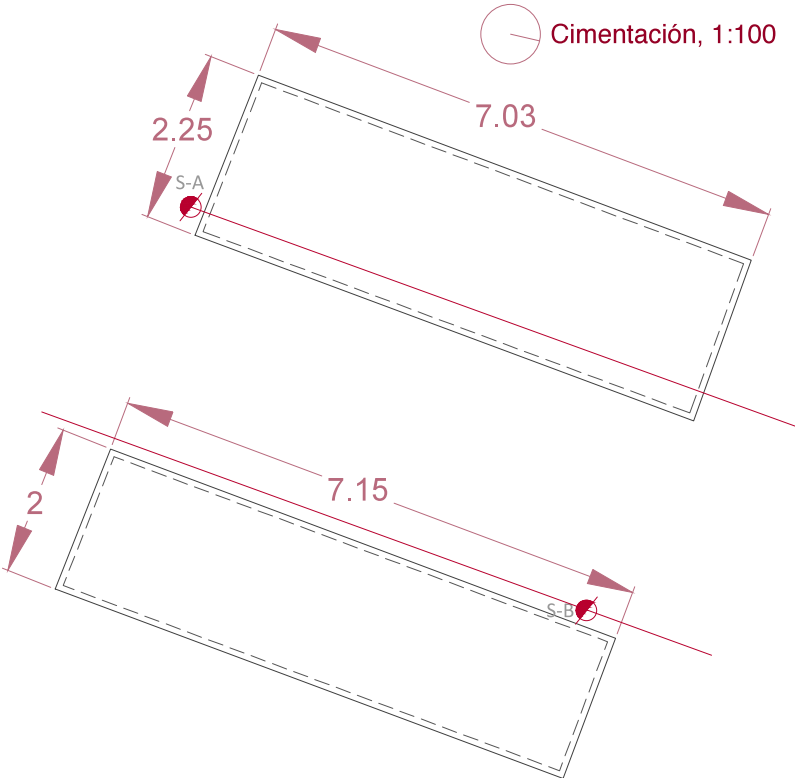
Fecha de construcción	Entre 1257 y 1258.
Imagen	 <p>Fig 7.2.1 Exterior de la Torre de La Catedral.</p>
Tipo de torre	Pertenece al grupo de las torres con estructura cristiana, considerada por algunos autores de estilo románico (ver punto 4.2.1).
Situación	Se adosa a los pies de la Catedral por el lado oeste. En el lado este se encuentra una casa del siglo XVI, la Casa del Deán.
	 <p>Plano de situación Escala 1:1000</p>
Altura, nº de cuerpos	28,25 metros hasta la cornisa del cuerpo de campanas (sin contar cimborrio). Altura total: 42,60 metros. Paso inferior más 2 cuerpos. 3 plantas al interior, 2 normales más el cuerpo de campanas.
Peso	12.474,84 KN (tablas en apartado de cálculos).

Características propias y defectos observados	Planta cuadrada.		Paso inferior con bóveda de cañón apuntado. Como refuerzo encontramos 3 arcos perpiaños.	
	Jambas de paso revestidas de sillares, moldura clásica, por lo que es muy posterior. Para reparar el deterioro de los ladrillos.			Estos arcos se apoyan sobre pilastras muy estrechas.
	Se extiende a edificios colindantes.			No está bien cuidada.
	Estos sillares aparecen como una corteza exterior y se encuentran abombados. Puede ser por estar sobrecargada, ya que su sección es muy pequeña (es un revestimiento), y parte de las cargas las aguanta la piedra. También la piedra tiene mayor rigidez que el ladrillo que se encuentra detrás, por lo que deforma mucho más.			
	Puede que las cargas de la torre sean excéntricas también, pudiendo ser causa del abultamiento.			
	Material de los sillares: Caliza no muy compacta de origen local.			
	Muro oeste compartido con la catedral (otra posible causa del abombado del muro).			La cimentación se encuentra visible en algunos puntos del paso inferior.
				Se ha pavimentado a un nivel inferior.
				Esto puede aumentar la luz de pandeo (ver punto 3.2).
				
			La catedral se encuentra acodalada por un arco al edificio de la Casa del Deán.	
			Este acodalamiento sujeta los movimientos de la catedral con este edificio.	
			Cornisa superior clásica. El remate superior es del siglo XVII y consiste en un cuerpo octogonal cubierto por un cupulín y una linterna más una aguja forjada (ver figura 7.2.1). Anteriormente tenía una cubierta a 4 aguas (como en la Torre de San Pedro).	
			1º cuerpo: ciego, sin aberturas.	
			2º cuerpo: con 2 ventanas con arquivoltas por lado, machones en esquinas y centro que vuelven a unirse formando el muro perimetral.	
			3º cuerpo: cuerpo de campanas. Aparecen 8 machones, 4 en las esquinas y 4 en el centro de cada lado.	
			Forjado del cuerpo de campanas sobre arco de medio punto que apoya sobre dos machones centrales (en segundo cuerpo).	
Rehabilitaciones e intervenciones sufridas	Revestimiento con sillares de las jambas del paso. Cuerpo superior añadido en 1577, cuando se amplió la iglesia. La cubierta es del siglo XVII. Restauración tras la Guerra Civil Española, sobre todo relacionado con la decoración.			

Planos

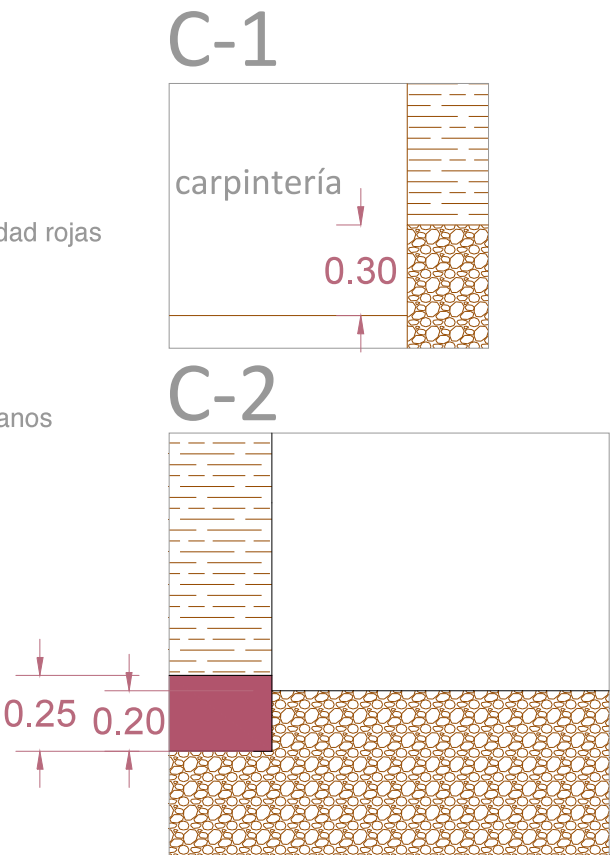


Cimentaciones
y suelo



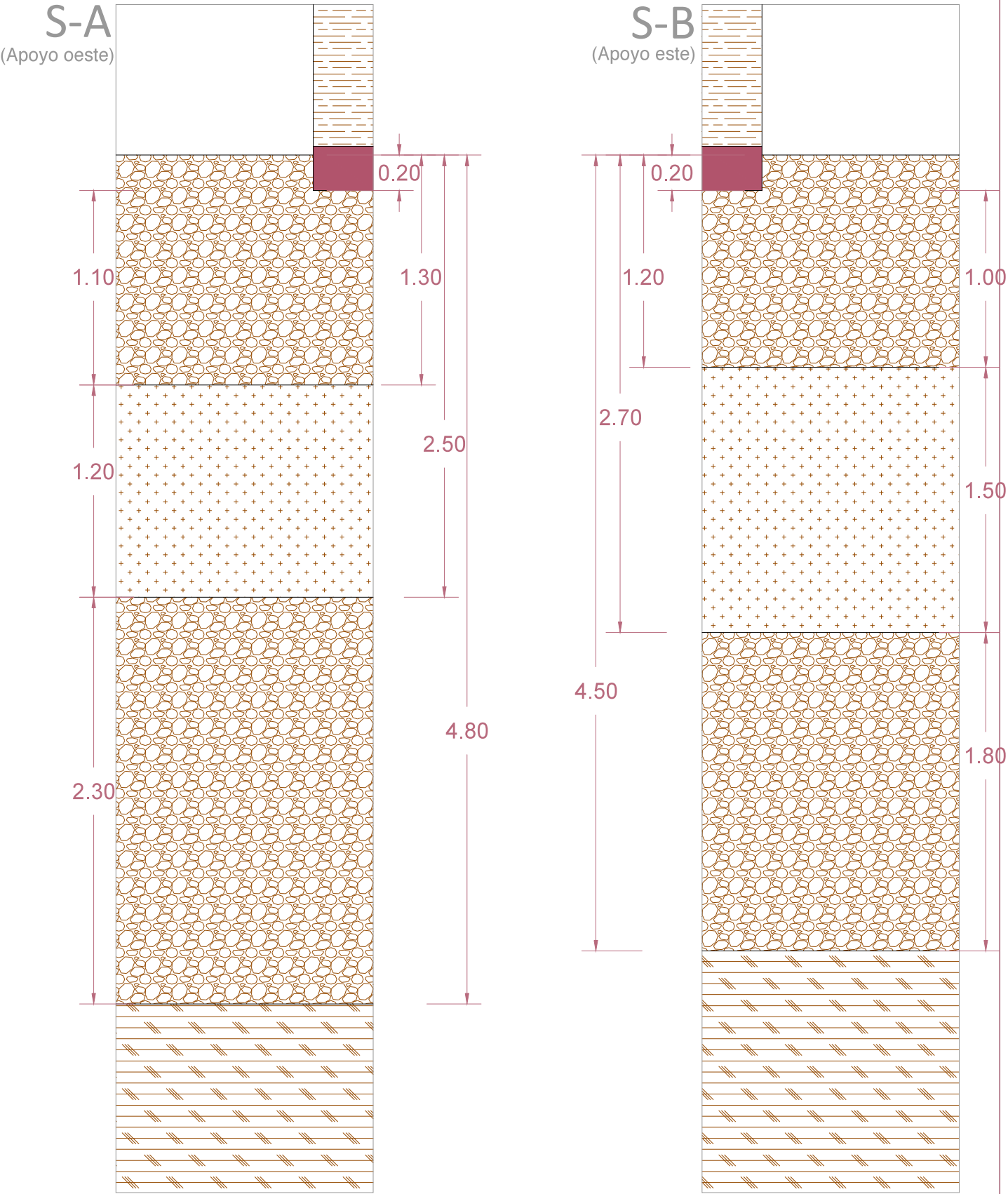
- Cimentación de la torre
- Pizorra
- Arcillas de baja plasticidad rojas
- Arenas cementadas
- Rellenos
- Restos de huesos humanos

C-Calicatas
S-Suelo



Calicatas, 1:25

Secciones del suelo afectado por la torre, 1:30



Cálculos realizados

Lado este	Volumen/2 (m3)	KN//m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	354,37	16			5669,92
piso-madera			87,5	3	262,5
bóvedas y cubierta			51	2	102
contrafuerte caliza	6,5	28			182
TOTAL					6216,42

Lado este	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=0,2			2	7,15		14,3	434,71		sobre pizorra	50	0,2	438,32
h=0,2 + 1	1	pizorra	3,80	8,95	42	34,020304	182,73		sobre arenas cimentadas	50	1,2	446,36
h=0,2+2,5	1,5	arenas	6,50	11,65	42	75,761671	82,05		sobre pizorra	50	2,7	453,37
h=0,2+4,3	1,8	pizorra	9,74	14,89	42	145,1142	42,84	281,1	sobre arcillas			

Lado oeste	Volumen/2 (m3)	KN//m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	354,37	16			5669,92
piso-madera			87,5	3	262,5
bóvedas y cubierta			51	2	102
contrafuerte caliza	8	28			224
TOTAL					6258,42

Lado oeste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=0,2			2,25	7,03		15,8175	395,66		sobre pizorra	50	0,2	438,99
h=0,2 + 1,1	1,1	pizorra	4,23	9,01	42	38,12407	164,16		sobre arenas cimentadas	50	1,3	447,62
h=0,2+2,3	1,2	arenas	6,39	11,17	42	71,408941	87,64		sobre pizorra	50	2,5	453,23
h=0,2+4,60	2,3	pizorra	10,53	15,31	42	161,31037	38,80	281,1	sobre arcillas			

TENSIÓN EN LA FÁBRICA DE LADRILLO	Superficie (m2)	Carga (KN)	Tensión (KN/m2)	Tensión admisible para la fábrica (KN/m2)
Lado este	12,20	6216,42	509,54	1000
Lado oeste	13,86	6258,42	451,55	1000

Conclusiones específicas

La torre se encuentra inclinada hacia el suroeste.

La razón de este giro no es el suelo, ya que ningún estrato recibe una tensión superior a su tensión admisible. Los asientos no son significativos y la diferencia de asientos entre un apoyo y otro no llega a 1 milímetro, siendo mayor en el lado este, por lo que no concuerda con el giro observado.

La poca profundidad de la cimentación de la torre (se encuentra visible en el paso inferior) aumenta el pandeo de la torre y su sensibilidad a los movimientos. Esto más la retracción del yeso durante su construcción en el lado sur y su posible lavado durante el tiempo pueden ser los causantes del movimiento de la torre.


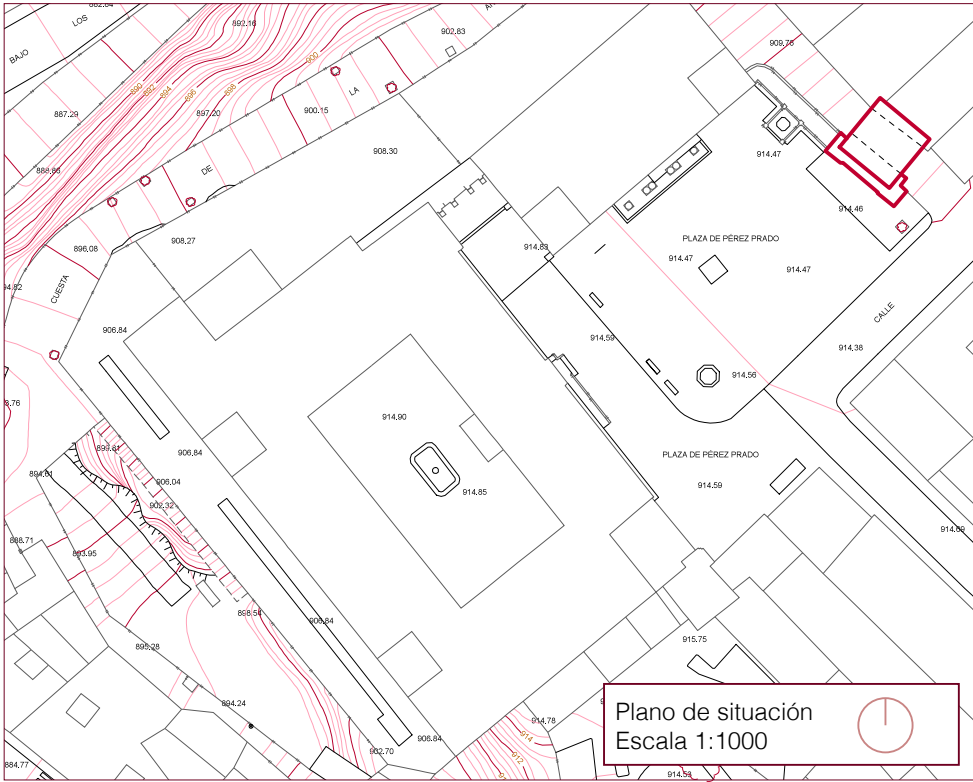
En cuento al abombado del revestimiento de piedra caliza del paso inferior, se asocia a una diferencia de rigideces entre este material y el ladrillo. Además puede ser que las cargas de la catedral sobre este lado hagan que la fábrica esté sobretensionada, favoreciendo este defecto, aunque la fábrica se encuentra dentro de la tensión admisible si se mira sólo las cargas de la torre.





Es la más deteriorada.



material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	1	2	7,15	434,71	3,575	1	0,51	100000	4,03502	
arenas	1,5	3,80	8,95	182,73	2,35498	0,7893	0,38	100000	2,40161	
pizorra	1,8	6,50	11,65	82,05	1,79206	0,5537	0,45	100000	2,18471	
arcilla	-	9,74	14,89	42,84	1,52856	-	1,38	100000	5,24161	13,86

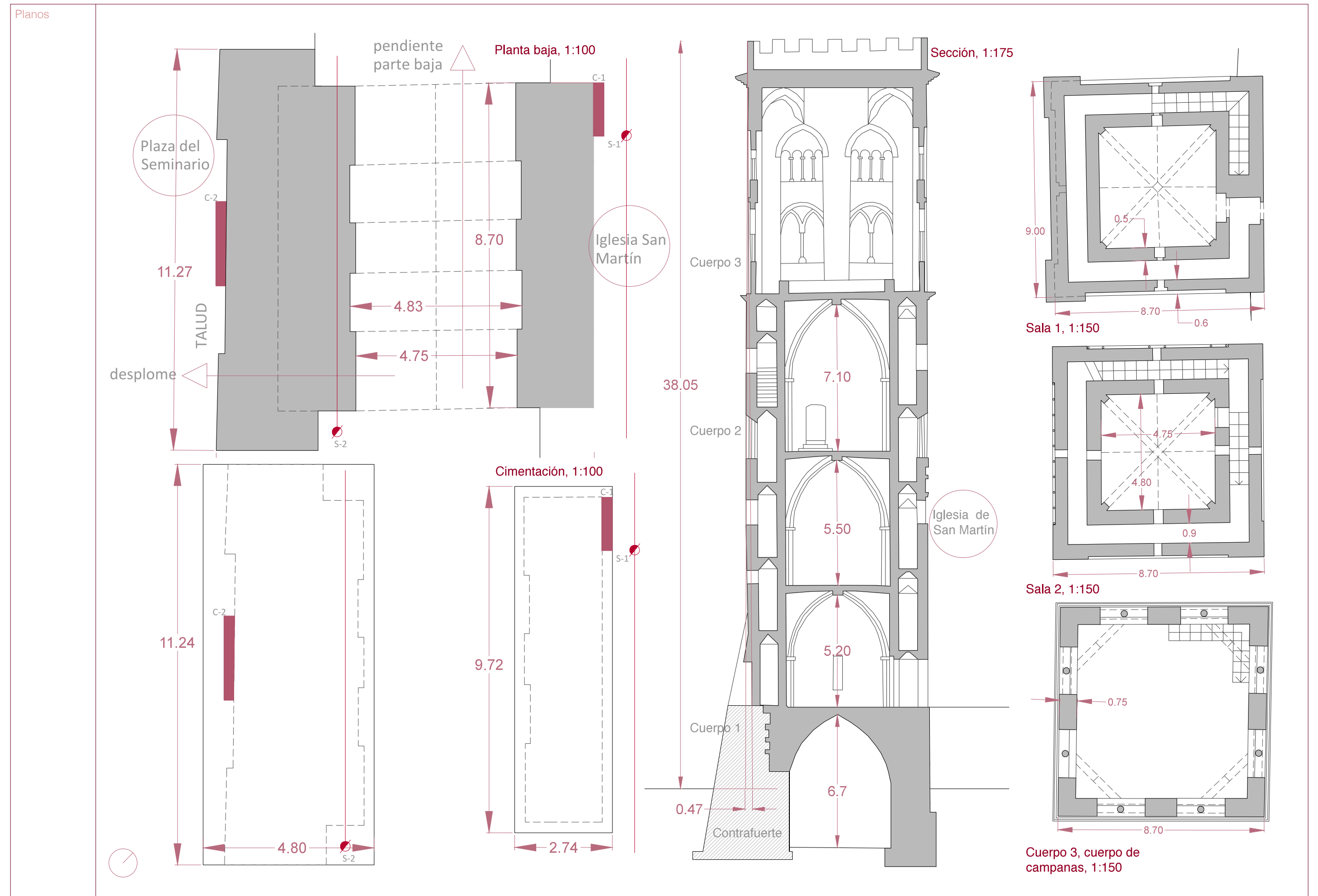
material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	1,1	2,25	7,03	395,66	3,12444	0,9778	0,51	100000	4,13163	
arenas	1,2	4,23	9,01	164,16	2,12979	0,5673	0,28	100000	1,76969	
pizorra	2,3	6,39	11,17	87,64	1,74783	0,7197	0,38	100000	1,93715	
arcilla	-	10,53	15,31	38,80	1,45378	-	1,28	100000	4,76031	12,60

7.3 TORRE DE SAN MARTÍN:

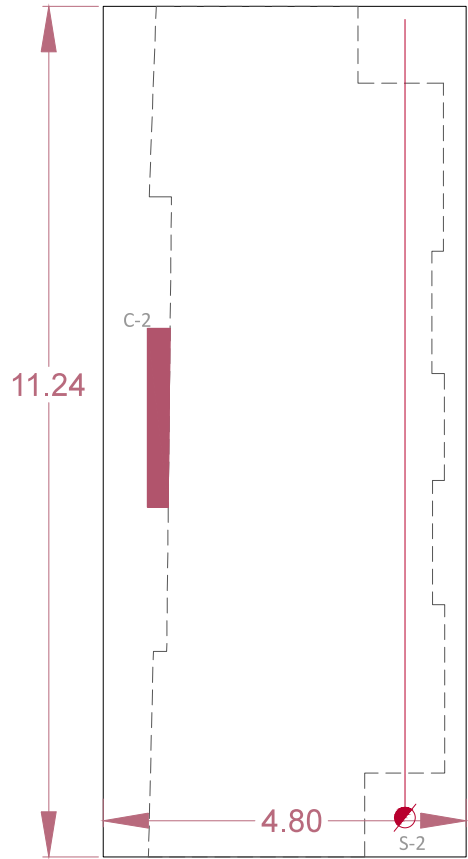
Fecha de construcción	Cimentaciones en 1314. Resto de la torre entre el 25 de marzo de 1315 y el 13 de abril de 1316.
Imagen	 <p>Fig 7.3.1 Exterior de la Torre de San Martín desde la Plaza del Seminario.</p>
Tipo de torre	Torre con estructura de alminar y campanario superpuesto (ver punto 4.2.2).
Situación	Se adosa a los pies de la iglesia de San Martín por el lado noreste. Se encuentra exenta por el resto de fachadas, dando a la Plaza del Seminario.
	 <p>Plano de situación Escala 1:1000</p>
Altura, nº de cuerpos	38,03 metros hasta antepecho que carga sobre la cornisa. Paso inferior más 2 cuerpos. Dentro del segundo cuerpo hay 3 salas superpuestas.
Peso	28.456,38 KN (tablas en apartado de cálculos).

Características propias y defectos observados	Planta cuadrada, aunque debido al desplome y a la torsión que sufre, puede tender a romboidal.		En el cuerpo de campanas encontramos 4 machones en esquina y 4 en el centro, como en los dos casos anteriores, para permitir la abertura de vanos.			Fig 7.3.6 Cuerpo de campanas desde el exterior.	
	Zócalo al interior del paso inferior de la torre. Consiste en dos hiladas de sillería y tres hiladas en las zonas correspondientes a los arcos fajones. Parecen ser originales, colocadas en el momento de la construcción de la torre.			Estos machones son más gruesos que el muro exterior, de 75 centímetros, por lo que vuelan hacia el interior 15 cm, apoyando en parte en las bóvedas de las escaleras.			Fig 7.3.7 Cuerpo de campanas desde el interior; Almagro Gorbea (1991).
	Paso inferior con bóveda de cañón apuntado, más esbelto que en los casos anteriores. Como refuerzo encontramos 3 arcos perpaños.			En las escaleras y el corredor (espacio entre los dos muros) se encuentran bóvedas enjarjadas (por aproximación de hiladas).		Fig 7.3.8 Bóvedas enjarjadas de la zona de escaleras; Almagro Gorbea (1991).	
	Estos arcos se apoyan sobre pilastras algo más anchas que en el caso de la Torre de La Catedral.	Los ladrillos que forman la bóveda son los originales, siendo ladrillos de tejar. Sin embargo, si miramos en la zona correspondiente al recalce (ver apartado de “Rehabilitaciones e intervenciones sufridas”), estos ladrillos son diferentes, ya que Ricardo García Guereta volvió a colocar ladrillos en esta zona, donde antes había sillería de piedra (intervención de Pierres Vedel en el siglo XVI). Al ser más nuevos, presentan eflorescencias (ver figuras 7.3.2, 7.3.3 y 7.3.5).		Serán horizontales en el corredor y escalonadas en la escalera.		Fig 7.3.9 Cubierta.	
	En general hay varios tipos de ladrillo en toda la torre debido a las diferentes intervenciones.	Sobre todo en el paso, los ladrillos se encuentran en mal estado debido en parte a la erosión que genera el tránsito de las personas por este paso.		Este espacio de circulación tiene un ancho de 90 centímetros.	La torre cuenta con un desplome de 47 centímetros contando hasta la cornisa superior del cuerpo de campanas en el lado del recalce en talud (suroeste).		
	Ladrillos en aparejo a sogá y tizón.		Tejado a 4 aguas, al que se le ha añadido un antepecho con almenas, a plomo con los paramentos de las fachadas.		El eje de la torre se encuentra inclinado hacia el oeste con un desplome de 25 centímetros.		
Espesor de los muros: 60 centímetros para el muro exterior. 50 centímetros para el muro interior. Es de ladrillo hasta la segunda sala del 2º cuerpo, después es de hormigón.		Superpuesta hay una cruz de hierro forjado.					
1º cuerpo: Paso inferior.		Hay una grieta en la bóveda de cañón apuntado.				Fig 7.3.10 Zoom de la bóveda del paso inferior.	
2º cuerpo: dentro de la torre interior se encuentran 3 salas superpuestas, cada una de mayor altura que la anterior según vamos subiendo (ver apartado de “Planos”).		Parece muy superficial, por lo que puede ser que se hicieran unos arcos fajones superpuestos a los ya existentes, de ahí que aparezcan grietas.					
Las pequeñas puertas de paso hacia estas salas se encuentran frente a las ventanas practicadas en el muro exterior, de esta forma se permite una pequeña entrada de luz al interior.		En el apoyo suroeste encontramos un recalce del siglo XVI, el cual se comenta en el apartado de “Rehabilitaciones e intervenciones sufridas”.		Fig 7.3.11 Grieta en el apoyo suroeste.			
Los forjados están formados por bóvedas de yeso y ladrillo en vez de forjados horizontales (como en los casos anteriores). Forman bóvedas ojivales de sección rectangular, transmitiendo empujes más verticales a los muros y permitiendo un menor espesor de estos. Aumentan el monolitismo del conjunto estructural, al colaborar en la estructura general y no como un elemento secundario.							
3º cuerpo: cuerpo de campanas. Se encuentra a gran altura. y está formado por un espacio único, ya que la torre interior desaparece.							

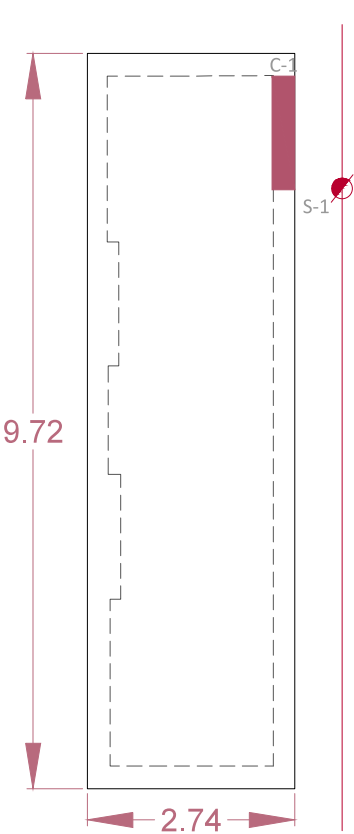
<p>Rehabilitaciones e intervenciones sufridas</p>	<p>1459-1451, recalce del pie suroeste por Pierres Vedel. 1926, restauración por Ricardo García Guereta. Restauración tras la Guerra Civil Española, restitución de parte de las piezas cerámicas, por Manuel Lorente Junquera. 2002-2007, restauración completa por Antonio Pérez Sánchez y José María Sanz Zaragoza.</p> <p><u>RECALCE DE 1459-1451:</u></p> <p>Esta intervención fue llevada a cabo por Pierres Vedel y su equipo interdisciplinar.</p> <p>Según el libro de asientos de la parroquia de San Martín: “En el año 1549 comenzamos a reparar el pie de la torre de la presente iglesia...la cual torre estaba con muy grande peligro de dar toda en tierra, por cuanto estaba molido todo el pie...El orden que tuvo fue que primero la apuntaló con mucha madera hasta unas señales que después los cerraron, donde emparentaron las puntas de las vigas, y al lado abrió un gran cimientó y lo obró de cal y canto hasta la cara de la tierra, y así estuvo un año apuntalada y con el dicho cimientó para que la obra hiciese asiento, y en el año 1551 comenzó a ir cortando de la torre, y así como iba cortando, iba reparando y obrando, y así poco a poco fue cortando todo el pie de la torre y lo dejó como ahora está.”</p> <p>Tanto García Guereta (1926) como Almagro Gorbea (1991) establecen que el agua más las bajas temperaturas descompusieron los ladrillos de la base. Esto llevó a una reducción de la sección de apoyo, incrementando las cargas por unidad de superficie en este lado. De esta forma la torre empezó a moverse hacia este punto más débil. Sin embargo, parece ser que antes de este hecho, sí había edificaciones en este lado (hubo pleitos por esto), y no se encontraba tan expuesto al clima.</p> <p>Estas edificaciones tuvieron que eliminarse para poder tener sitio para el apeo, y posteriormente Pierres Vedel dejó escrito que no se construyeran más edificios adosados a este pie (para evitar sobrecargas). Por esta razón es la única torre que está exenta por 3 de sus lados.</p> <p>Se utilizó sillares de piedra caliza de escasa consistencia, los cuales están bastante erosionados por el paso del tiempo (fig. 7.3.16). Para la sustitución, se realizó un cajeado en el ladrillo, eliminando incluso columnillas (fig. 7.3.15.).</p> <p>No se sabe si se mantiene parte de la estructura en el interior del talud practicado, desconociendo la verdadera resistencia del recalce y su composición interior.</p> <p>La forma de talud para aumentar la superficie de apoyo lleva a pensar que Pierres Vedel consideraba que el existente era escaso, y por tanto también causante de la inclinación de la torre.</p> <p>Los sillares se encontraban presentes en el paso inferior también.</p> <p>La torre ya estaba inclinada, presentando el desplome actual de 47cm hacia este pie.</p> <p>Fue Ricardo García Guereta, encargado de la restauración en 1926, quien definió los problemas de esta intervención.</p>	<p><u>INTERVENCIÓN DE RICARDO GARCÍA GUERETA EN 1926:</u></p> <p>Este arquitecto detectó una serie de problemas en el proyecto inicial de la torre, de 1315:</p> <ul style="list-style-type: none">- Desigualdad de las cargas debido a los distintos grosores de los muros, provocando dislocaciones de la bóveda de sustentación- Cargas superiores a la resistencia del material empleado y a la estructura y dimensiones de los elementos sustentantes (se comprobará en el apartado de “Cálculos”).- Carencia de atado en el cuerpo de campanas.- El propio sistema de abovedamiento empleado en el cuerpo de campanas. <p>Además, establece que el suelo sobre el que asienta la torre es de muy mala calidad (ver apartado “cimentaciones y suelo”. Indica que por culpa de las características del suelo la torre comenzó a inclinarse hacia el oeste, y que por culpa del apeo que mantuvo durante un año Pierres Vedel, la torre giró hacia el lado suroeste, llegando al desplome comentado de 47 centímetros.</p> <p>Otras quejas hacia la intervención de Pierres Vedel son el material utilizado y la incorrecta identificación de la causa del daño, agravando los daños que ya tenía la torre.</p> <p>La torre estaba realizada en ladrillo y yeso y no entendía porqué Vedel utilizó sillería de caliza descompuesta, muy coquerosa, casi estalactítica y de menor calidad que la utilizada en su momento en el zócalo. De esta forma, eliminó la sillería del paso inferior y la volvió a sustituir por ladrillo.</p> <p>Comprobó la estabilidad de la estructura, confirmando que no es la culpable de estos movimientos, ya que el trabajo conjunto de los dos muros y las escaleras está equilibrado.</p> <p>Tras el análisis que realizó del conjunto, realizó las siguientes acciones:</p> <ul style="list-style-type: none">- Consolidación del recalce.- Descarga de los arcos fajones de la embocadura.- Atado eficaz entre los 8 machones del cuerpo de campanas. <div></div> <div></div> <p>Almagro Gorbea y los encargados de la última restauración, Antonio Pérez Sánchez y José María Sanz Zaragoza, sí creen que la intervención de Pierres Vedel fue efectiva y que sin ella no habría llegado la torre hasta nuestros días, apesar de no ser la sillería el mejor material para realizar la intervención.</p>
---	---	---



Cimentaciones
y suelo

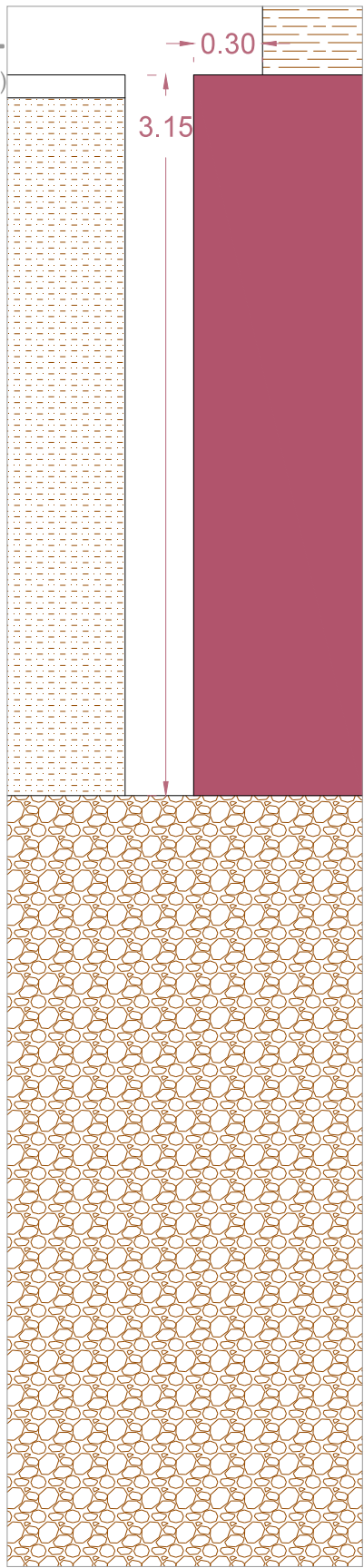


Cimentación, 1:100

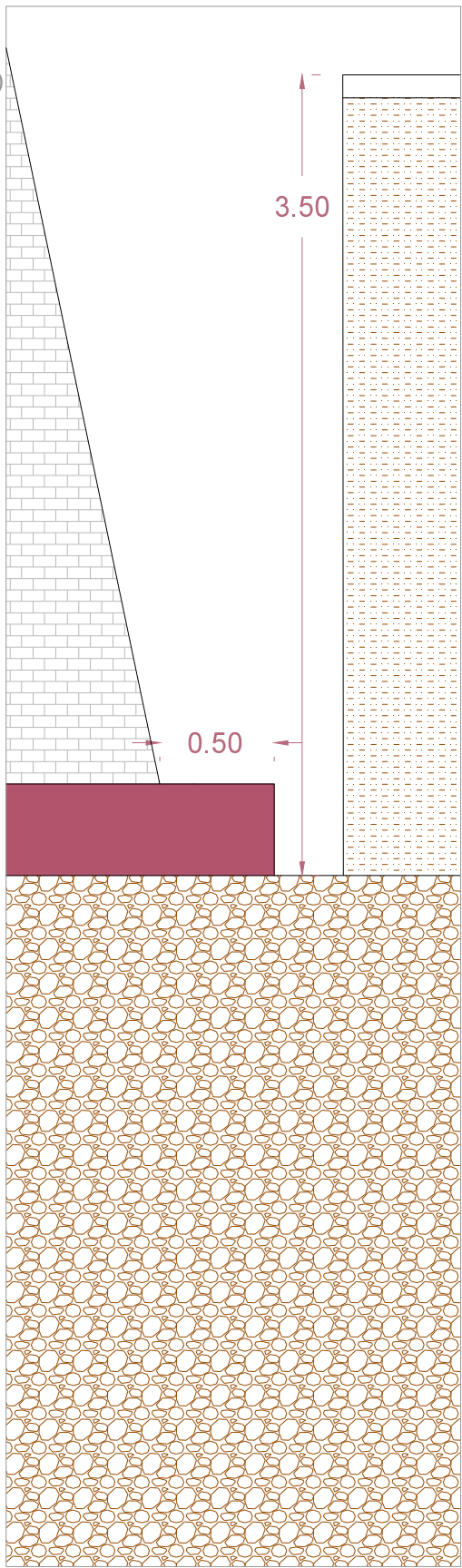


Secciones del suelo afectado por la torre, 1:30

C-1; S-1
(Apoyo suroeste)



C-2; S-2
(Apoyo noreste)



- Cimentación de la torre
- Pizorra
- Arcillas de baja plasticidad rojas
- Arenas cementadas
- Rellenos
- Restos de huesos humanos
- C-Calicatas
- S-Suelo

Son dos los autores que destacan las malas caracterís-
ticas del suelo:

- Mariano Navarro Aranda (1954): defiende
que la torre se inclinaba por el fallo del terreno
poco compacto.

- Ricardo García Guereta (1926): destaca la
mala calidad del terreno, al estar formado por
terreno de aluvión, conglomerado de garbanci-
llo, almendrilla y cantos rodados en grandes
bloques, alternando con margas calizas
descompuestas y en la superficie tierra
vegetal. Luego comenta que el terreno se
encuentra en declive hasta un corte vertical a
50 m al noroeste, causando movimientos
hacia ese lado por depresión del terreno.

Cálculos realizados

CON CONTRAFUERTE:

Lado suroeste (contrafuerte)	Volumen/2 (m3)	KN//m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	566,168	16			9058,69
piso-madera			45,9325	3	137,7975
bóvedas y cubierta			72,4325	2	144,865
contrafuerte caliza	349,06	28			9773,68
TOTAL					19115,03

Lado suroeste (contrafuerte)	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=3,5			4,8	11,24	42	53,952	354,30		sobre pizorra	50	3,5	465,40
h=3,5+1	1	pizorra	6,60	13,04	42	86,079872	222,06156		sobre pizorra	50	4,5	466,77

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	-	4,8	11,24	354,30	2,34167	-	1,615	100000	24,99324	24,99324

ANTES DEL CONTRAFUERTE:

Lado suroeste (sin contrafuerte)	Volumen/2 (m3)	KN//m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	647,336	16			10357,38
piso-madera			45,9325	3	137,7975
bóvedas y cubierta			72,4325	2	144,865
contrafuerte caliza	0	28			0
TOTAL					10640,04

Lado suroeste (contrafuerte)	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=3,5			2,74	9,72	42	26,6328	399,51		sobre pizorra	50	3,5	476,09
h=3,5+1	1	pizorra	4,54	11,52	42	52,313779	203,38884		sobre pizorra	50	4,5	475,93

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	-	2,74	9,72	399,51	3,54745	-	1,615	100000	16,08758	16,08758

Lado noreste	Volumen/2 (m3)	KN//m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	566,168	16			9058,69
piso-madera			45,9325	3	137,7975
bóvedas y cubierta			72,4325	2	144,865
contrafuerte caliza	0	28			0
TOTAL					9341,35

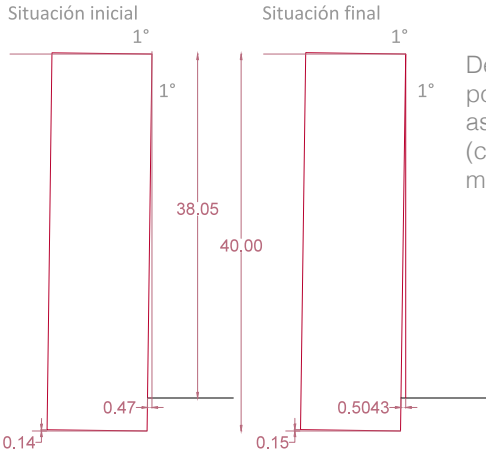
Lado noreste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=3,15			2,74	9,72	42	26,6328	350,75		sobre pizorra	50	3,15	470,99
h=3,15+1,35	1,35	pizorra	5,17	12,15	42	62,834396	148,66619		sobre pizorra	50	4,5	471,84

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	-	2,74	9,72	350,75	3,54745	-	1,87	100000	16,35409	16,35409

TENSIÓN EN LA FÁBRICA DE LADRILLO	Superficie (m2)	Carga (KN)	Tensión (KN/m2)	Tensión admisible para la fábrica (KN/m2)
Lado suroeste	39,32	19115,03	486,14	1000
Lado noreste	19,00	9341,35	491,65	1000
Todo el Área	30	28456,38	948,55	1000

DISTORSIÓN ANGULAR:



Δasiento (cm)	L (m)	L (cm)	β
0,863915182	10,62	1062	0,0008135
















Desplome producido por la diferencia de asiento de 0,863 cm (calculado gráfica-mente).

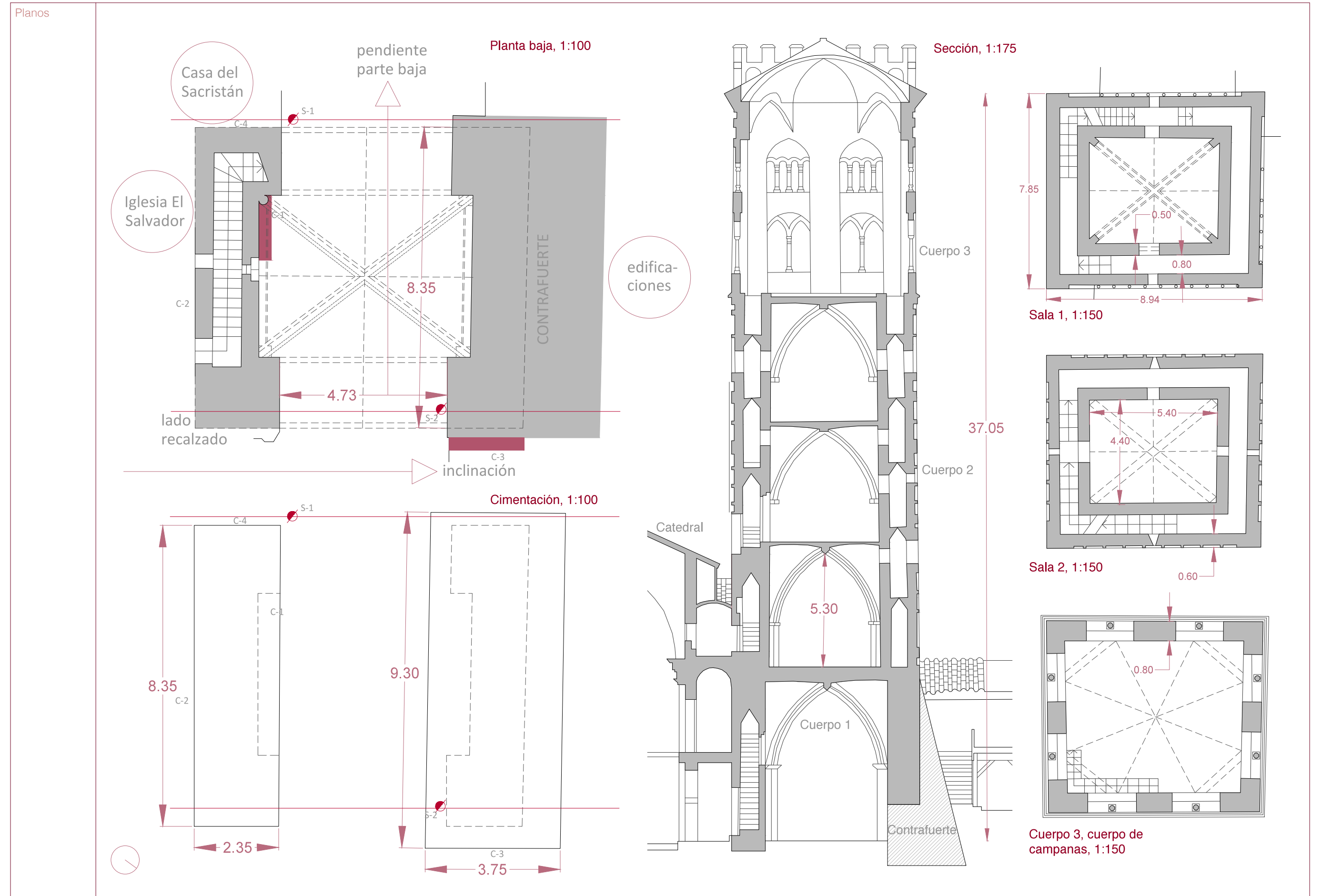
Conclusiones específicas	<p>La torre de San Martín tiene un desplome significativo hacia su apoyo recalzado (apoyo suroeste).</p> <p>A contrario de lo que dicen algunos autores (Mariano Navarro Aranda y Ricardo García Guereta), el suelo no puede ser mejor, por lo que no es el motivo principal de este giro. Las tensiones de trabajo que transmiten las cimentaciones al suelo no superan las tensiones admisibles de éste.</p> <p>Ambos apoyos se encuentran sobre el mismo tipo de terreno y, de no haber contrafuerte, ambos lados aguantarían las mismas cargas y el asiento sería prácticamente el mismo (16,08 mm y 16,35 mm).</p> <p>La iglesia de San Martín es abovedada, pero al ser reciente (siglo XIX) no se considera que pueda estar transmitiendo empujes hacia la torre.</p> <p>Sin embargo, el recalce practicado en el lado suroeste con piedra caliza aporta incluso más peso que lo que corresponde a este apoyo por la torre en sí. Esto aumenta el asiento posible a 24,99 mm, casi 1 centímetro más que en el pie contrario.</p> <p>El fuerte desnivel del terreno que se encuentra a 50 metros de la torre puede ser el motivo que causó el movimiento inicial de la torre. Por otro lado, el recalce realizado para reparar el pie suroeste en el siglo XVI no se debió realizar en plenas condiciones y el apeo no fue el adecuado, favoreciendo el desplome hacia este lado. Por tanto se cuenta con un desplome de 47 cm medido desde la cornisa. Si a esto le sumamos el desplome que puede provocar ese centímetro de asiento diferencial, el desplome puede llegar a 50,43 cm. No supone un riesgo para la estabilidad, pero sí aumentará la tensión en este lado de la cimentación.</p> <p>Por otro lado, los muros del cuerpo 2 y 3 son quizás demasiado delgados, ya que están próximos al límite de tensión admisible de la fábrica. Si además existieran problemas de escasa sección en las bóvedas de las escaleras (como pasa en la Torre de El Salvador), las cargas no se distribuirían uniformemente, llevando a zonas más cargadas que otras y favoreciendo el pandeo.</p> <p>Por último, al no saber el material utilizado en el interior del contrafuerte, no se sabe realmente su tensión admisible y, por tanto, los efectos que tendrá el desplome sobre él.</p>
---------------------------------	---

7.4 TORRE DE EL SALVADOR:

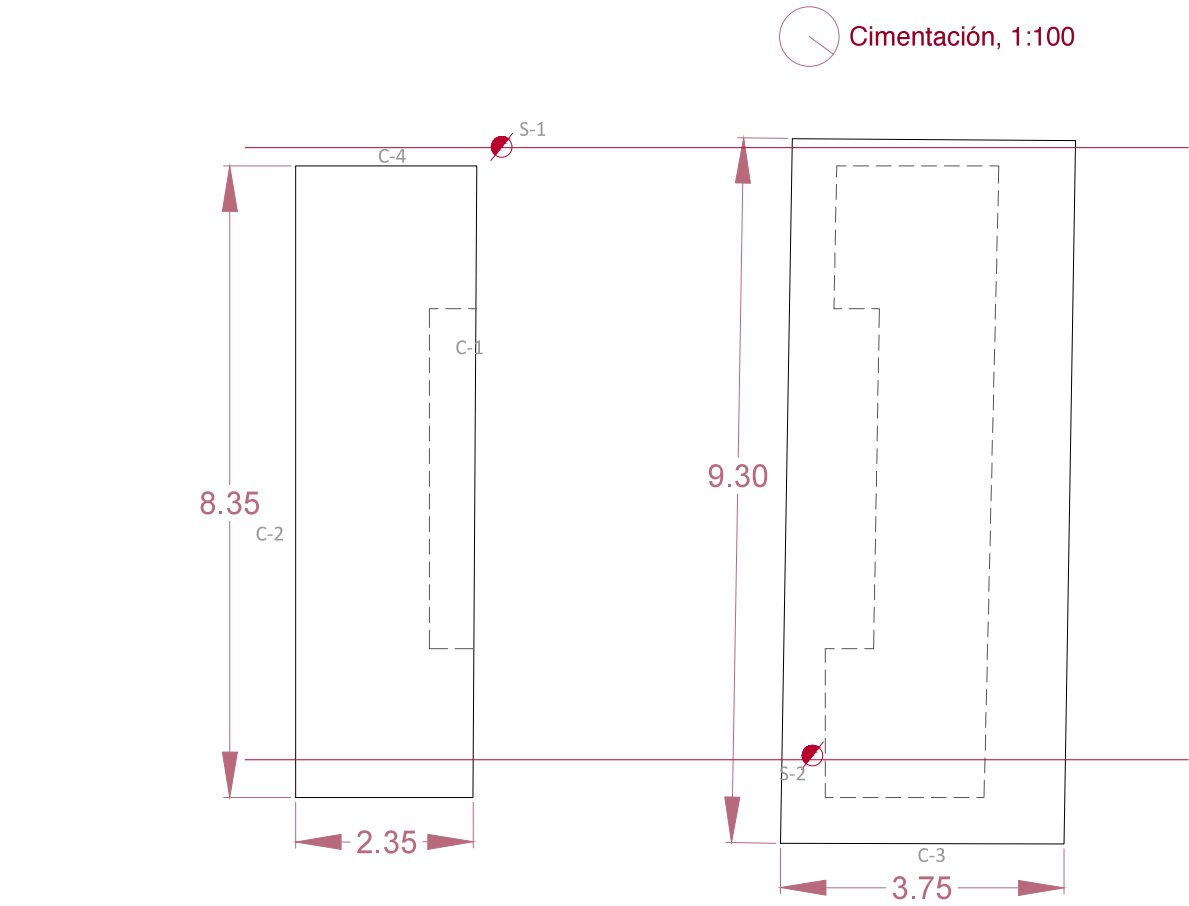
Fecha de construcción	Poco después de la Torre de San Martín, primer cuarto del siglo XIV (por estar más evolucionada).
Imagen	 <p>Fig 7.4.1 Exterior de la Torre de El Salvador.</p>
Tipo de torre	Torre con estructura de alminar y campanario superpuesto (ver punto 4.2.2).
Situación	Se adosa al lateral de la iglesia de San Salvador en su apoyo sureste y a otras edificaciones por su apoyo noroeste.
	 <p>Plano de situación Escala 1:1000</p>
Altura, nº de cuerpos	37,05 metros hasta cornisa del cuerpo de campanas. Paso inferior más 2 cuerpos. Dentro del segundo cuerpo hay 3 salas superpuestas.
Peso	20.015,23 KN (tablas en apartado de cálculos).

Características propias y defectos observados	<p>Planta ligeramente rectangular.</p> <p>Paso inferior diferente al resto de las torres. Parece una sala más de las que se encuentran en el 2º cuerpo y no un paso cubierto con bóveda simplemente.</p> <p>Se encuentra cubierto con bóvedas de ojivas (influencia gótica). Las aperturas de paso están formadas por arcos apuntados y jambas resaltadas.</p> <p>También encontramos arcos apuntados adosados a los lados ciegos de la “sala”.</p> <p>Jambas de los arcos de paso (excepto una) se encuentran revestidas de sillares, moldura clásica, por lo que es muy posterior. Para reparar el deterioro de los ladrillos.</p> <p>Estos sillares aparecen como una corteza exterior y se encuentran abombados. Puede ser por estar sobrecargada, ya que su sección es muy pequeña (es un revestimiento), y parte de las cargas las aguanta la piedra. También la piedra tiene mayor rigidez que el ladrillo que se encuentra detrás, por lo que deforma mucho más.</p> <p>Puede que las cargas de la torre sean excéntricas también, pudiendo ser causa del abombamiento.</p> <p><u>Material de los sillares:</u> Caliza no muy compacta de origen local.</p> <p>Ladrillos en aparejo a soga y tizón.</p> <p>Espesor de los muros: 60 centímetros para el muro exterior. Ladrillo. 50 centímetros para el muro interior. Muro de tapial de yeso.</p>	 <p>Fig 7.4.2 Paso inferior, apoyo noroeste.</p>  <p>Fig 7.4.3 Paso inferior, apoyo sureste.</p>  <p>Fig 7.4.4 Bóveda de ojivas del paso inferior.</p>	<p>En las escaleras y el corredor (espacio entre los dos muros) se encuentran bóvedas enjarjadas (por aproximación de hiladas).</p> <p>Serán horizontales en el corredor y escalonadas en la escalera.</p> <p>Este espacio de circulación tiene un ancho de 80 centímetros.</p> <p>Tienen escaso espesor por lo que presentan fisuras en las claves de las falsas bóvedas, disminuyendo la ventaja de rigidización y conexión entre muros.</p> <p>Se puede apreciar el mal estado del ladrillo.</p>	 <p>Fig 7.4.7 Bóvedas de las escaleras.</p>  <p>Fig 7.4.8 Mal estado de las bóvedas de las escaleras.</p>
	<p><u>1º cuerpo:</u> Paso inferior.</p> <p><u>2º cuerpo:</u> dentro de la torre interior se encuentran 3 salas superpuestas.</p> <p>Las pequeñas puertas de paso hacia estas salas se encuentran frente a las ventanas practicadas en el muro exterior. También se encuentran practicadas ventanas en el muro interior que coinciden con las del muro exterior, para una mayor iluminación.</p> <p>Los forjados están formados por bóvedas de yeso y ladrillo en vez de forjados horizontales (como en los casos anteriores). Forman bóvedas ojivales de sección rectangular en la 2ª y 3ª sala, mientras que en la 1ª hay nervios abaquetonados, transmitiendo empujes más verticales a los muros y permitiendo un menor espesor de estos. Aumentan el monolitismo del conjunto estructural, al colaborar en la estructura general y no como un elemento secundario.</p> <p><u>3º cuerpo:</u> cuerpo de campanas. Similar al de la Torre de San Martín. Se encuentra a gran altura y está formado por un espacio único, ya que la torre interior desaparece.</p>	 <p>Fig 7.4.5 Interior primera sala.</p>  <p>Fig 7.4.5 Corredor.</p>  <p>Fig 7.4.6 Bóveda de ojivas de la primera sala.</p>	<p>En el cuerpo de campanas encontramos 4 machones en esquina y 4 en el centro, como en los dos casos anteriores, para permitir la abertura de vanos.</p> <p>Estos machones son más gruesos que el muro exterior, por lo que vuelan hacia el interior 15 cm.</p> <p>Encontramos 4 arcos oblicuos en las esquinas y los espacios entre estos arcos y los ángulos de la torre se cierran con bóvedas de enjarjes. Sobre ellos se ve el arranque de una bóveda de 8 paños.</p> <p>Hoy en día se ve una estructura de hormigón de 8 paños planos sobre la que apoya la cubierta.</p>	 <p>Fig 7.4.9 Comienzo cuerpo de campanas.</p>  <p>Fig 7.4.10 Cuerpo de campanas.</p>  <p>Fig 7.4.11 Bóveda del cuerpo de campanas.</p>
			<p>En los encuentros entre el muro de tapial de yeso (interior) y las bóvedas de las salas, se pueden encontrar rellenos.</p>	 <p>Fig 7.4.12 Tercera sala.</p>
			<p>Almenado ornamental en el peto, perforado por arquillos de medio punto de igual anchura que las almenas (ver figura 7.4.1).</p> <p>Acceso en cota 0 desde el interior de la iglesia, con escalera interior en el estribo sureste.</p> <p>En el apoyo noroeste tenemos un recalde de 1659, el cual se comenta en el apartado “Rehabilitaciones e intervenciones sufridas”.</p>	

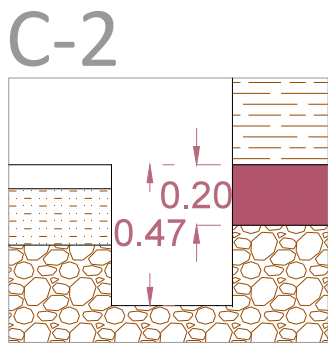
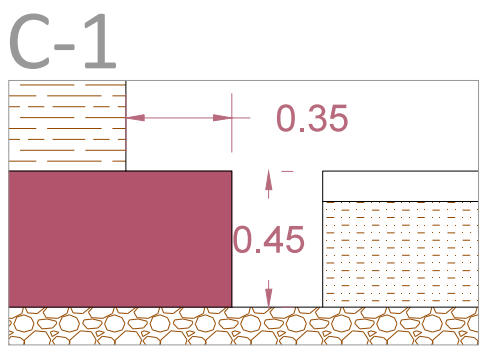
<p>Rehabilitaciones e intervenciones sufridas</p>	<p>1659, refuerzo del pie con sillares de piedra con forma de talud. 1914, intervención de Luis Ferreres. 1929, Ricardo García Guereta redactó un proyecto de restauración, pero no llegó a realizarse. 1954, restauración por el Patrimonio Artístico Nacional, a manos de Manuel Lorente Junquera. 1993, intervención de Antonio Pérez y José María Sanz Zaragoza.</p> <p><u>RECALCE DE 1659:</u></p> <p>Este recalce es similar al que sufrió la Torre de San Martín. Sin embargo sólo se substituyó una parte del ladrillo original.</p> <p>Se puede ver de nuevo el cajeadado que se hizo en el ladrillo para introducir los sillares de piedra caliza.</p> <p>Al estar protegido por las edificaciones de alrededor, parece que la piedra se encuentra en mejor estado.</p> <p>En la parte del interior del paso se ve la moldura clásica que se colocó en el Renacimiento, al igual que en las torres de San Pedro y La Catedral.</p> <div data-bbox="912 430 1356 1088">  </div> <p>Fig 7.4.13 Recalce en apoyo noroeste.</p> <p><u>INTERVENCIÓN DE 1993:</u></p> <p>Identificaron los siguientes problemas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erosión de las juntas de yeso de la fábrica, aumentando con la altura, debido al estancamiento de agua y nieve. - Falta de un contrafuerte de la iglesia, adosado a la torre junto a su arista sureste y una aparente concentración de las grietas de mayor entidad de componente vertical. Se encontraron los restos de su cimentación, acompañados por rellenos. - Ese estribo de la torre junto a la iglesia se encontraba sin cimentación, apoyando el ladrillo directamente en la pizarra. <p>Se llevó a cabo el recalce de ese lado, y se dotó este apoyo de una falda perimetral a sus pies para evitar deslizamientos. También se reconstruyó el contrafuerte-arista de la torre, además de colocar llaves para el cosido de las grietas estabilizadas.</p>
---	---



Cimentaciones
y suelo



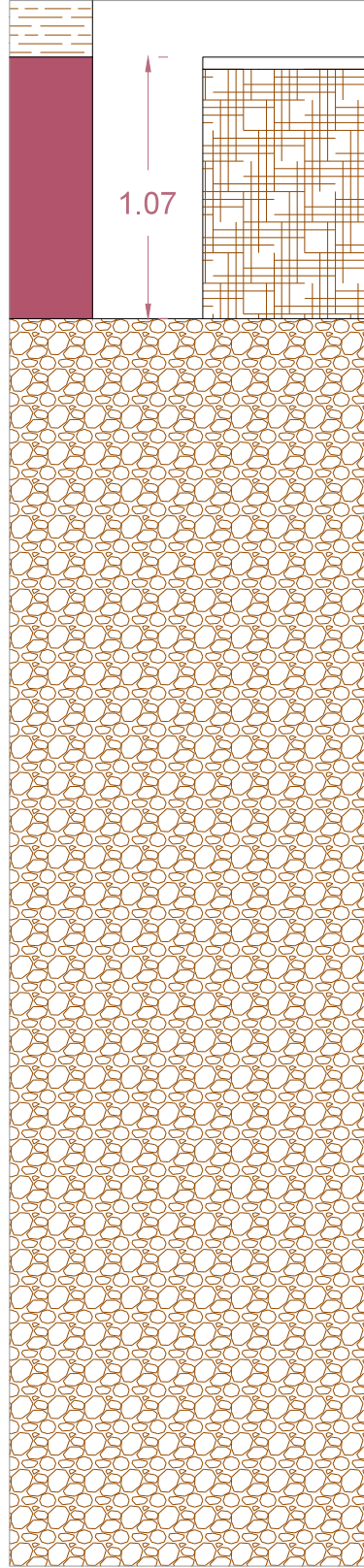
- Cimentación de la torre
- Pizorra
- Arcillas de baja plasticidad rojas
- Arenas cementadas
- Rellenos
- Restos de huesos humanos
- C-Calicatas
- S-Suelo



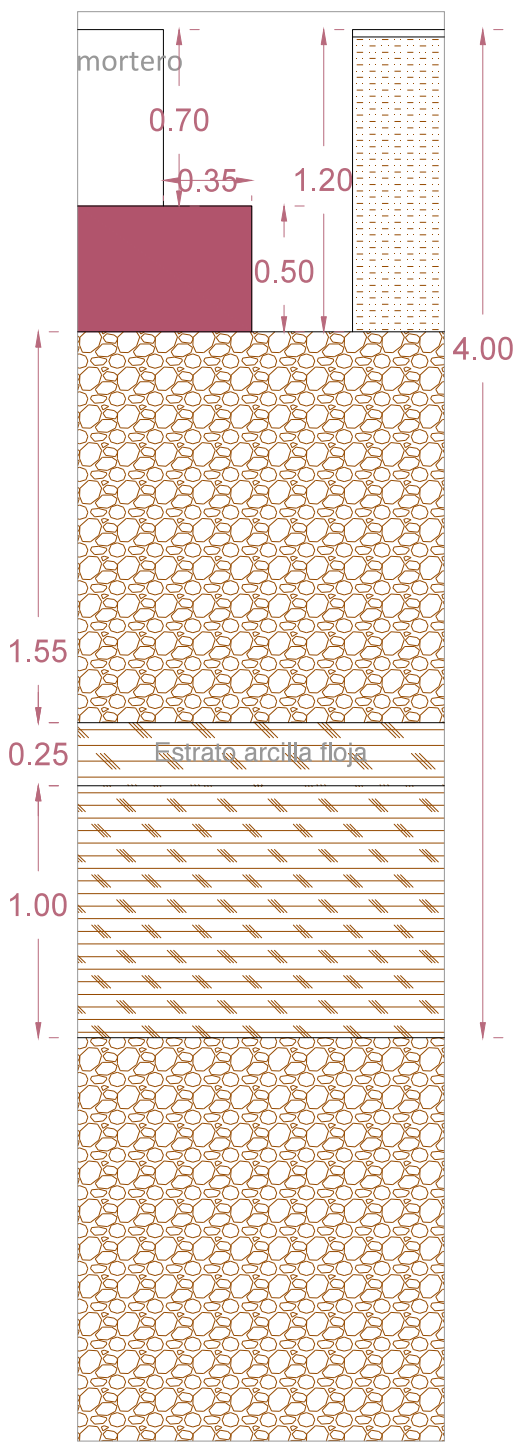
Calicatas, 1:25

Secciones del suelo afectado por la torre, 1:30

C-4; S-1 (Apoyo sureste)



C-3; S-2 (Apoyo noroeste)



Cálculos realizados

CON CONTRAFUERTE:

Lado noroeste	Volumen/2 (m3)	KN/m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	486,0458	16			7776,73
piso-madera			43,1505	3	129,4515
bóvedas y cubierta			55,3955	2	110,791
contrafuerte caliza	123,58	28			3460,24
TOTAL					11477,22

Lado noroeste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=1,2			3,75	9,3	42	34,88	329,10		sobre pizorra	50	1,2	444,55
h=1,55+1,2	1,55	pizorra	6,54	12,09	42	79,09	145,11	53	sobre arcillas			
h=1,80+1,2	0,25	arcillas	6,74	12,29	22	82,90	138,45	338	sobre arcillas			
h=2,80+1,2		1 arcillas	7,55	13,10	22	98,93	116,01		sobre pizorra	50	4	461,12

Lado noroeste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=1,20-0,47			3,75	9,3	42	34,88	329,10		sobre pizorra	50	0,73	437,37
h=3,45	2,72	pizorra	8,65	14,20	42	122,79	93,47		sobre pizorra	50	3,45	450,86

ANTES DEL CONTRAFUERTE:

Lado noroeste	Volumen/2 (m3)	KN/m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	518,6108	16			8297,77
piso-madera			43,1505	3	129,4515
bóvedas y cubierta			55,3955	2	110,791
contrafuerte caliza	0	28			0
TOTAL					8538,02

Lado noroeste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=1,2			3,75	9,3	42	34,88	244,82		sobre pizorra	50	1,2	444,55
h=1,55+1,2	1,55	pizorra	6,54	12,09	42	79,09	107,95	53	sobre arcillas			
h=1,80+1,2	0,25	arcillas	6,74	12,29	22	82,90	103,00	338	sobre arcillas			
h=2,80+1,2		1 arcillas	7,55	13,10	22	98,93	86,30		sobre pizorra	50	4	461,12

Lado noroeste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=1,20-0,47			3,75	9,3	42	34,88	244,82		sobre pizorra	50	0,73	437,37
h=3,45	2,72	pizorra	8,65	14,20	42	122,79	69,53		sobre pizorra	50	3,45	450,86

Lado sureste	Volumen/2 (m3)	KN/m3	Superficie	KN/m2	TOTAL KN
ladrillo	518,6108	16			8297,77
piso-madera			43,1505	3	129,4515
bóvedas y cubierta			55,3955	2	110,791
contrafuerte caliza	0	28			0
TOTAL					8538,02

Lado sureste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=1,2			2,35	8,35	42	19,6225	435,11		sobre pizorra	50	1,2	449,82
h=1,55+1,2	1,55	pizorra	5,14	11,14	42	57,27999288	149,06	53	sobre arcillas			
h=1,80+1,2	0,25	arcillas	5,34	11,34	22	60,61008171	140,87	338	sobre arcillas			
h=2,80+1,2		1 arcillas	6,15	12,15	22	74,746623	114,23		sobre pizorra	50	4	466,08

Lado sureste	h estrato		B	L	θ	Área	qb	qu	apoya en	Nspt	D	q adm
h=1,20-0,47			2,35	8,35	42	19,6225	435,11		sobre pizorra	50	0,73	441,77
h=3,45	2,72	pizorra	7,25	13,25	42	96,02556227	88,91398		sobre pizorra	50	3,45	454,63

TENSIÓN EN LA FÁBRICA DE LADRILLO	Superficie (m2)	Carga (KN)	Tensión (KN/m2)	Tensión admisible para la fábrica (KN/m2)
Lado noroeste	11,20	8538,02	762,32	1000
Lado sureste	46,00	11477,22	249,50	1000
Todo el Área	26	20015,23	769,82	1000

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	1,55	3,75	9,3	329,10	2,48	0,82667	0,4164	100000	4,6763358	
arcillas	0,25	6,54	12,09	145,11	1,848461	0,07644	0,04	5300	6,5191467	
arcillas	1	6,74	12,29	138,45	1,823043	0,29659	0,045	100000	0,3823166	
pizorra	-	7,55	13,10	116,01	1,734971	-	1,45	100000	11,559284	18,46

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	-	3,75	9,3	329,10	2,48	-	1,65	100000	18,530149	18,53015

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	1,55	3,75	9,3	244,82	2,48	0,82667	0,4164	100000	3,478773	
arcillas	0,25	6,54	12,09	107,95	1,848461	0,07644	0,04	5300	4,8496584	
arcillas	1	6,74	12,29	103,00	1,823043	0,29659	0,045	100000	0,2844092	
pizorra	-	7,55	13,10	86,30	1,734971	-	1,45	100000	8,599067	13,73

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	-	3,75	9,3	244,82	2,48	-	1,65	100000	13,784763	13,78476

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	1,55	2,35	8,35	435,11	3,553191	1,31915	0,65	100000	6,0481869	
arcillas	0,25	5,14	11,14	149,06	2,167031	0,09725	0,051	5300	6,7105576	
arcillas	1	5,34	11,34	140,87	2,122909	0,3743	0,2	100000	1,3699043	
pizorra	-	6,15	12,15	114,23	1,975401	-	1,53	100000	9,7828718	17,86

material	e estrato	B sobre estrato	Lsobre estrato	qb sobre estr.	m	h/a	K0	E KN/m2	s (mm)	TOTAL ASIENTO
										mm
pizorra	-	2,35	8,35	435,11	3,553191	-	1,87	100000	17,400168	17,40017

Conclusiones específicas	<p>La torre de El Salvador tiene un desplome fuerte hacia su apoyo noroeste, apoyo en el que se encuentra realizado el recalce con forma de talud.</p> <p>En este lado se encuentra un estrato de arcilla floja de 25 centímetros, con una tensión admisible de 53 KN/m², el cual recibe una tensión de trabajo 3 veces superior. No parece que sea un problema debido a su pequeño espesor, además de que el asiento total de este apoyo es muy similar al del apoyo contrario.</p> <p>En este caso pasa lo mismo que en la Torre de San Martín, el recalce realizado en el apoyo noroeste, contrario a la iglesia, aporta una sobrecarga considerable si se compara con el peso de la torre. Es más, sin contrafuerte, sería el lado contrario el que asentaría 5 milímetros más que este.</p> <p>Sin embargo, no hay nada sobretensionado salvo el estrato comentado, por lo que el suelo no es la razón del desplome.</p> <p>Una explicación al problema sería que en el proceso de recalce, no se realizara correctamente el apeo para llevarlo a cabo.</p> <p>Por otro lado, el espacio entre el muro exterior y el muro interior en 10 centímetros inferior que en la Torre de San Martín, reduciendo el momento de inercia y aumentando mínimamente el pandeo.</p> <p>Por último, en cuanto al abombado del revestimiento de piedra caliza del paso inferior, se asocia a una diferencia de rigideces entre este material y el ladrillo. Además puede ser que las cargas de la iglesia sobre este lado hagan que la fábrica esté sobretensionada, favoreciendo este defecto, aunque la fábrica se encuentra dentro de la tensión admisible si se mira sólo las cargas de la torre.</p>
--------------------------	---

8 CONCLUSIONES:

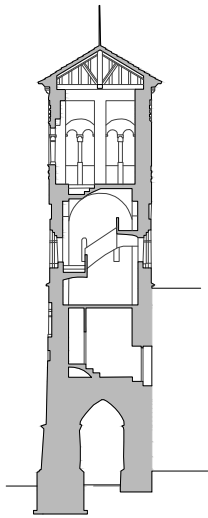
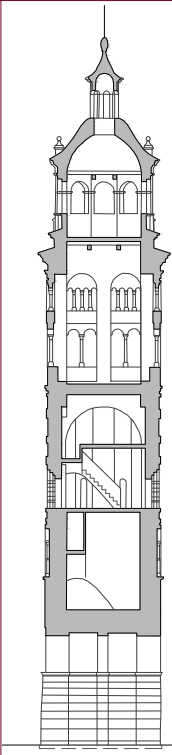
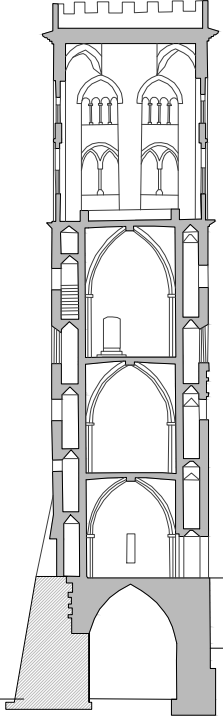
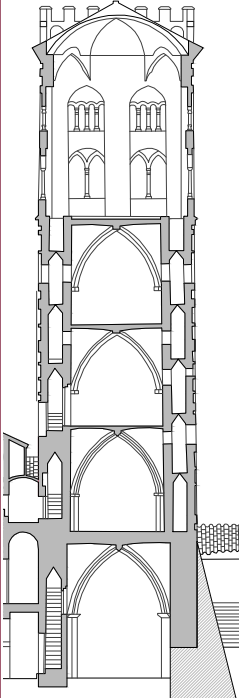

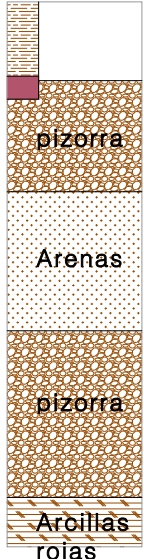
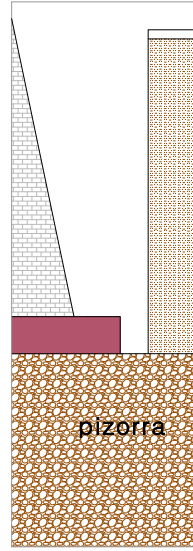

Torre	SAN PEDRO	LA CATEDRAL	SAN MARTÍN	EL SALVADOR
Tipo estructura	Estructura cristiana	Estructura cristiana	Estructura de alminar con campanario	Estructura de alminar con campanario
Altura	23,45 m	42,60 m	38,03 m	37,05 m
Peso	10.924,42 KN	12.474,84 KN	28.456,38 KN	20.015,23 KN
Adosada a iglesia	Apoyo este	Apoyo oeste	Apoyo noreste	Apoyo sureste
Recalce/talud	Apoyo oeste	No parece	Apoyo suroeste	Apoyo noroeste
Giro hacia	Apoyo oeste	Suroeste	Apoyo suroeste	Apoyo noroeste
Asientos relevantes	No	No	Diferencia de 1 cm entre apoyos	No
Estrato problemático	No	No	No	Arcilla floja
Sección 1:400				
Suelo				

Fig. 16, cuadro resumen.

Para terminar, se exponen las siguientes conclusiones:

- Las dimensiones de las zapatas son poco mayores que el perímetro del muro de las torres, tal y como se ha explicado que era común en la Edad Media y debido al paso inferior. Esto hace que las tensiones en la base de las zapatas sean mayores de lo necesario. Se ha visto como en al menos tres de los cuatro casos (menos la Torre de La Catedral) se ha tenido que ensanchar esta superficie de apoyo.
- Lo normal era que en esta época, y debido a la falta continua de recursos tanto económicos como humanos, se construyera este tipo de edificaciones por fases, lo que permitía corregir las deformaciones que se iban formando. Las Torres de Teruel se construyeron en el tiempo de un año, no pudiendo corregir este tipo de deformaciones, los cuales se iban acumulando.
- Las cimentaciones de las cuatro torres son superficiales, llegando incluso a verse en el caso de la Torre de La Catedral. Esto favorece el cabeceo y los giros monolíticos que se pueden producir ante cualquier incidencia.
- Ninguna de las torres, salvo quizás la Torre de la Catedral (inclinación hacia el suroeste), presenta inclinaciones hacia el sur o el este (ver figura 16), tal y como defiende Almagro Gorbea (1991), explicando que estas son las caras más expuestas al sol y que, en el momento de su construcción, el yeso secaba con mayor rapidez en estas fachadas, teniendo una retracción mayor. Este no es el motivo del giro de las torres.
- El ladrillo y el mortero de yeso se encuentran en muy mal estado y pueden generar asientos diferenciales por el lavado del mortero que se ha producido por el estancamiento de agua y nieve en las juntas, ayudando a los desplomes generados por otras causas.
- El abombado del revestimiento de piedra caliza de los pasos inferiores se debe a la diferencia de deformaciones entre ésta y el ladrillo. La piedra es mucho más rígida y por tanto aguanta menos las deformaciones producidas por las sobrecargas.
- El suelo sobre el que apoyan las torres tiene buenas características, y se considera un suelo duro, ya que la media de las tensiones admisibles de los diferentes estratos está por encima de 400 KN/m². Además, en ningún momento la tensión de trabajo que transmiten las zapatas al terreno supera la tensión admisible del estrato, por lo que no es la causa del cabeceo de las torres.

Hay que exceptuar el caso del estrato de arcilla floja (q admisible de 53 KN/m²) encontrado en la Torre de El Salvador, pero se ha visto ya en el correspondiente dossier que no genera problemas de ningún tipo ni asientos que afecten a la estabilidad de la torre.

Por otro lado, no se encuentra presencia de agua ni de sulfatos, por lo que este motivo no ha podido empeorar las condiciones del suelo ni deteriorar las cimentaciones.

- Los asientos calculados son admisibles y, al no corresponder con las inclinaciones observadas de las torres, permiten confirmar junto al punto anterior que el suelo no es el causante de los daños de las torres.
- Si es cierto que el desnivel del terreno que se produce a 50 metros de la Torre de San Martín pudo comenzar su movimiento en su inicio, pero desde luego no tiene que ver con los estratos que forman el suelo. Lo mismo pasa con la Torre de San Pedro, ya que el fuerte desnivel que se encuentra a 5 metros de la base de la torre ha podido comenzar el giro de la torre, pero el tipo de suelo sobre el que cimenta tiene unas buenas características.
- El único desplome que quizás pueda llamar la atención es el que se produce en la Torre de San Martín, con un asiento diferencial de 1 cm hacia el lado del recalce y que lleva el desplome inicial de 47 cm a 50,43 cm. Sin embargo esto se debe a la mala realización del recalce en el siglo XVI, donde el apeo no se debió realizar de la forma más adecuada y el cual se mantuvo durante un año, favoreciendo el desplome de la torre. A esto hay que añadir que el contrafuerte de caliza aumenta al doble las cargas sobre el pie recalzado, favoreciendo el asiento de este lado. Esto mismo pasa con la Torre de El Salvador, aunque el asiento diferencial no llega a este punto.

- Todos los taludes practicados en las torres se encuentran en el lado contrario a la iglesia, es decir, en el lado más expuesto, y todas ellas han girado hacia este lado. Se puede decir entonces que las torres han girado hacia su lado más expuesto, o de otra manera, hacia el que era más fácil por no encontrar oposición, además de por los motivos de los puntos anteriores.

De esta forma, se puede confirmar que la razón que daban los autores como Mariano Navarro Aranda, Ricardo García Guereta o Antonio Almagro Gorbea acerca de que el suelo no era bueno y era uno de las causantes de los movimientos de las torres no es cierta.

Son los errores producidos en la ejecución de los recalces de las torres, el hecho de tener un paso inferior que hace que tengan una carga en los apoyos más elevada que una torre convencional, el estar adosadas a un lado de la torre y por tanto estar más expuestas y en concreto los desniveles de terreno en el caso de la Torre de San Pedro y de San Martín los causantes de sus problemas de giros.

9 BIBLIOGRAFÍA:

- Almagro Gorbea, A. & Borrás Gualis, G.M. 1991, Teruel mudéjar: patrimonio de la humanidad, Caja de Ahorros y Monte de Piedad de Zaragoza, Aragón y Rioja, Zaragoza.
- Almagro Gorbea, A. 2004, "La catedral y torres de Teruel", AA.VV.: Obras singulares de la Arquitectura y la Ingeniería Españolas, pp. 104-107, Madrid.
- Borrás Gualis, G.M. 1985, Arte mudéjar aragonés, Colegio Oficial de Aparejadores y Arquitectos Técnicos de Zaragoza, Zaragoza.
- Borrás Gualis, G.M. 2006, "Estructuras mudéjares aragonesas", Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- Chamoso Lamas, M., González, V. & Regal, B. 1979, *Galicia*, Encuentro Ediciones, Madrid.
- Criado Mainar, J., Institución Fernando el Católico & Universidad de Zaragoza Departamento de Historia del Arte 2002, Arte Mudéjar Aragonés, Patrimonio de la Humanidad: actas del X Coloquio de Arte Aragonés, Institución "Fernando el Católico", Zaragoza.
- Corrección de errores y erratas de la orden VIV/984/2009 de 15 de abril, por la que se modifican determinados documentos básicos del Código Técnico de la Edificación, aprobados por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, y el Real Decreto 1371/2007, de 19 de octubre. (BOE 23-septiembre-2009). DB-SE Bases de Cálculo y DB-SE Acciones en la edificación.
- García Gamallo, A.M. 1997, La evolución de las cimentaciones en la historia de la arquitectura: desde la prehistoria hasta la primera revolución industrial, E.T.S. Arquitectura (UPM).
- García Guereta, R. 1926, Las torres de Teruel, Gráficas Reunidas, Madrid.
- GEONOC S.A. Estudios geotécnicos, 1991, Estudio Geotécnico en el entorno próximo de las Torres Mudéjares de Teruel.
- Huerta Fernández, S. 2004, Arcos, bóvedas y cúpulas: geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica, Instituto Juan de Herrera, Madrid.
- Ibáñez Fernández, J. 2005, Arquitectura aragonesa del siglo XVI: propuestas de renovación en tiempos de Hernando de Aragón (1539-1575), Institución Fernando el Católico, Zaragoza.
- Ibáñez Fernández, J. 2004, Ingeniería y práctica constructiva al servicio de la conservación arquitectónica: Pierres Vedel y el reparo de la torre mudéjar de San Martín de Teruel (1549-1551), Studium: Revista de Humanidades, nº10, pp. 197-220.
- Kerisel, J. 2005, Of Stones and Man: from the Pharaohs to the present day, Taylor & Francis, London.
- Kerisel, J. 1987, Down to earth: foundations past and present : the invisible art of the builder, A.A.Balkema, Rotterdam.
- Leeuwen, T.A.P. 1986, The skyward trend of thought: the metaphysics of the american skyscraper, MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- Monsalud, E.M.d. Torres del Salvador y de San Martín, y techumbre de la Catedral de Teruel, s.n., S.I.
- Muzás Labad, F. & Fundación Escuela de la Edificación 2007, *Mecánica del suelo y cimentaciones*, Fundación Escuela de la Edificación, Madrid.
- Navarro Aranda, M. 1954, Las torres de Teruel, Institución Fernando El Católico de la Diputación Provincial de Zaragoza, Zaragoza.
- Pérez Sánchez, A. & Sanz Zaragoza, J.M. 1993, "Restauración de la torre mudéjar del Salvador de Teruel. Aragón, España", Informes de la Construcción, vol. 45, pp. 49-58.

Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación.
Texto modificado por RD 1371/2007, de 19 de octubre (BOE 23/10/2007) y corrección de errores
(BOE 25/01/2008). DB-SE Cimientos.

www.alhambra-patronato.es, Recursos de investigación de la Alhambra (figura 3).

www.habitantesdelanada.blogspot.com (figura 15).

www.panoramio.com (figura 12).

www.racv.es/files/Patologia-y-recalce-de-cimentaciones_0.pdf

